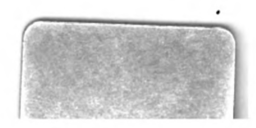
Die elektrizität

A. Gerteis

Die Elektrizität.

Ihre Eigenschaften, Wirkungen und Gesetze.



Die Elektrizität.

Ihre Eigenschaften, Wirkungen und Gesetze.

Wissen und Leistungen

der

modernen Starkstrom-Elektrotechnik

Mit Ausschluss der elektrischen Bahnen.

Erster Teil.

Die Elektrizität.

Ihre Eigenschaften, Wirkungen und Gesetze.

Von

A. Gerteis

Ingenieur.

Halle-S.

C. O. Lehmann.

1901.

Die Elektrizität.

Ihre Eigenschaften, Wirkungen und Gesetze.

Von

A. Gerteis

Ingenieur.

Mit 57 Textfiguren und 1 Tafel



Halle-S.

C. O. Lehmann.

1901.

Vorrede.

Das Wissen, das sich im Laufe der Jahre über den in dem vorliegenden Buch klarzulegenden Gegenstand angehäuft hat, ist entweder in den speziell wissenschaftlichen Produktionen, oder in Zeitschriften, oder in den sogenannten populären Werken niedergelegt. Mit dieser Verschiedenheit der Aufbewahrungsorte geht eine solche der formalen Ausgestaltung Hand in Hand.

Wissenschaftliche Bücher geben zwar oft ausführliche und mehr oder weniger zusammenhängende Darstellungen, aber sie verlangen eine Beherrschung der wissenschaftlichen Sprache und Fertigkeit in der Handhabung eines ausgedehnten mathematischen Apparates. Ausserdem sind derartige Bücher in der Regel nicht darauf angelegt, dem Leser eine richtige Werttaxirung der einzelnen Wissensbestandteile zu geben. Die wenigen litterarischen Erzeugnisse, die auch nach dieser Richtung Rühmliches zu verzeichnen haben, rühren von Männern her, die in der Technik Fuss gefasst haben, oder ihr doch wenigstens nahestehen. Zeitschriften und namentlich technische, enthalten manche gesunde Gedanken, Darstellungen und Resultate, die jedoch begreiflicherweise nur für denjenigen ihren vollen Wert besitzen, der das Wissen über die Elektrizität bereits insichträgt, also nicht für den, der es sich erst aneignen will.

Schlecht bestellt ist es mit der Wissensausprägung über die Elektrizität in den sogenannten populären Produktionen. Voll formaler und inhaltlicher Mängel, dazu beseelt von einer zu-

langenden Dosis Geistesarmut, wenden sie sich an das grosse Publikum und erzeugen dort jene Sorte Halbwissen, das viel schlimmer als gar kein Wissen ist. Das zweifelhafte Hülfsmittelchen zahlreicher Illustrationen muss dabei herhalten, um den innerlich morschen Bau zu verdecken. Wer demnach heute am schlechtesten in Bezug auf geeignete literarische Hülfsmittel wegkommt, ist einmal der Techniker, dem die Basis der wissenschaftlichen Ausbildung fehlt und dann auch der eigentliche Mann der Praxis, der Monteur.

Das vorliegende Werkchen ist nach Kräften bemüht, diese Lücke in den vorhandenen gedruckten Unterweisungen über die Elektrizität auszufüllen. Mit der Entwicklung der Grundbegriffe beginnend, sucht es, bei thunlichster Umgehung des mathematischen Hülfsmittels, in lückenloser Form, das Wesen, das Wirken und die Gesetze der Elektrizität, dem Rahmen des Gesammtwerkes entsprechend, dem Leser fasslich nahezurücken. Die Darlegung der bis zur Neuzeit gewonnenen Erkenntnisse erfolgt in kurzen, dabei doch möglichst vollkommenen und der Sache auf den Grund gehenden Fassungen; in der Raumbemessung für die einzelnen Entwicklungen ist deren Bedeutung, im Rahmen des Gesammten, als Richtschnur und Grössenmaassstab zu Hülfe genommen worden.

Zur ganz allgemeinen Kennzeichnung des von dem Verfasser Gewollten, sei als Schlusswort ein Ausspruch des geistes- und charaktergewaltigen Eugen Dühring angefügt: «Für Unterricht, Bildung und praktische Anwendung taugt nur die völlig systematisirte und kritische Vereinigung des Besten und am meisten Charakteristischen, was geliefert werden und woraus derjenige, der es sich zu eigen macht, leicht alles Übrige selbstständig gewinnen kann».

Teplitz in Böhmen, im Februar 1901.

A. Gerteis.

Inhalt.



Abschnitt I.

Das Wesen der fliessenden Elektrizität und die zugehörigen Hauptbegriffe. Die Stromarten.

Wer je als unbefangener Beobachter eine grössere elektrische Anlage mit seinem Besuche beehrte und von den Angestellten die Belehrung erhielt: Hier in diesem herumsausenden Rad wird die Elektrizität erzeugt, in den wunderlich ausgebildeten Apparaten auf dem architektonisch wirksamen Schaltbrette wird sie verteilt, gemessen und regulirt, in den dicken Kupferdrähten, welche sich spinnennetzartig über alle Strassen erstrecken, wird sie fortgeleitet und in den Häusern der Bürger meldet sie ihre Ankunft durch das Leuchten der Glüh- und Bogenlampen oder durch den Antrieb von Elektromotoren — dem musste sich die Frage auf die Zunge legen: Was ist das für ein merkwürdiges Ding, das solcher umfang- und sinnreicher Mechanismen zur Erzeugung und Fortsendung bedarf, das Licht und mechanische Kraft hervorbringt und von dem man mit den Sinnen absolut nichts wahrnimmt? Was sich diesen aufdrängt, sind ja nur die Wirkungen, nicht aber die Ursachen der Wirkungen. Unwillkürlich ist der Beobachter geneigt, einen Wertmaasstab an eine so ausserordentlich frappirende und blendende Thätigkeitsrichtung zu legen, der weit über den hinausgeht, mit welchem er zum mindesten ebenbürtige, aber seiner Vorstellungskraft vielleicht näherliegende Errungenschaften menschlichen Geistes zu messen pflegt. Was ihm imponirt, ist der Umstand, dass die Elektrotechnik, ohne die Elektrizität selbst genauer in ihrem Wesen zu kennen, sich dennoch derselben in so reichem Maasse dienstbar gemacht hat.

Dieser für die menschlichen Sinne unfassbaren Elektrizität die ganze Unsumme von Wirkungen abzulauschen, welche eine elektrische Zentrale in ihren Einrichtungen besitzt, war eine Arbeit von Jahrzehnten und von manchem Tausend denkenden Köpfen und werkthätigen Händen. Die Geschichte der Elektrizität bezw. der Elektrotechnik lehrt die dornenvollen Pfade kennen, auf welchen die bahnbrechenden Entdecker und Erfinder zu wandeln hatten, ehe sie sich am Ziele ihrer Bestrebungen sahen. Sie zeigt auch, wie schon die ersten unscheinbaren Entdeckungen auf diesem Gebiete das Verlangen nach einer Vorstellung von dem Wesen der Elektrizität erweckte. Diese Vorstellung, einmal geboren, musste im Entwicklungsverlaufe der Elektrizitätslehre viele Wandlungen durchmachen. Zugestutzt für den jeweilig vorhandenen Kenntnissstand elektrischer Wirkungen, musste sie in dem Augenblicke ihren Wert verlieren, in dem sich dieser erheblich erweiterte.

Dieser Umstand hat in zuständigen Kreisen schon vielfach die Frage reifen lassen, ob es für eine gedeihliche Entwicklung dieser Wissenschaft überhaupt von Vorteil ist, Hypothesen über ein Wesen aufzustellen, das unsern Sinnen wohl für immer verschlossen bleiben dürfte. Der mathematisch geschulte Physiker, welcher die Resultate der Erfahrung als bequemes Objekt für seine Virtuosität im endlosen Ausspinnen von Zahlen und Buchstaben betrachtet, wird der Hypothesen auf diesem Gebiete entbehren können, nicht aber der eigentliche Bahnbrecher der elektrischen Wissenschaft, der Experimentator. Für ihn sind die Wesensvorstellungen der belebende Geist, welcher seinen Versuchen erst das wahre Leben einhaucht. Dabei sucht er die Vorstellungen so auszugestalten, dass alle bekannten elektrischen Erscheinungen durch sie eine Erklärung erfahren können. In einer ähnlichen Empfindungslage wie der Experimentator befindet sich auch derjenige, dem nicht allein die Elektrizitätslehre, sondern überhaupt die Naturwissenschaften ein fremdes Gebiet sind, dem aber ein Beherrschen aus Zweckmässigkeitsgründen oder aus Wissensdrang geboten scheint.

Die Wesensvorstellungen im Interesse einer allgemein verständlichen Darlegung der elektrischen Erscheinungen und Einrichtungen sind ohne Frage nach etwas andern Gesichtspunkten auszubilden, wie die im Interesse der Wissenschaftsförderung.

Sie sollen sich zwar nach Möglichkeit an diese anlehnen, aber doch so gehalten sein, dass allgemein geläufige Vorstellungen aus bekannteren Gebieten als Bausteine verwendet werden können. Die Möglichkeit, sich die Elektrizität in den hier in Frage kommenden Einrichtungen als eine fliessende Flüssigkeit vorzustellen, gestattet bis zu einem gewissen Grade die Hereinziehung der Vorstellungen, welche bei in Röhren fliessendem Wasser gäng und gäbe sind. Damit ist aber für die fassliche Durchführung einer das Wesentliche umfassenden Lehre der elektrischen Erscheinungen ausserordentlich viel gewonnen.

Die modernste Anschauung von dem Wesen der Elektrizität — eine Anschauung, welcher eine Reformatorrolle par excellence für die Zukunft vorbehalten erscheint — sucht die Elektrizität ebenfalls als eine Art Flüssigkeit aufzufassen. Sehr erhebliche prinzipielle Abweichungen kann demnach die Wesensvorstellung der Elektrizität, im Dienste der populären Darstellung, von der modernsten, im Dienste der Wissenschaft, nicht haben, was ihr ohne Zweifel nur förderlich ist. Unter diesen Umständen in groben Zügen eine Darstellung von dem Bau dieser modernsten Anschauung zu geben, kommt der Vorausschickung einer aufklärenden Einleitung an Wirkung gleich; das daraufmfolgende Abschwenken dieser Anschauung nach der Seite der populären Brauchbarkeit und ihre Ausbildung auf die experimentell festgestellten Thatsachen, der eines vertiefenden Hauptinhaltes.

Nach der modernsten Anschauung über die Elektrizität hat man sich diese als eine Art überaus feine, unwägbare und unzusammendrückbare Flüssigkeit vorzustellen, welche das ganze Weltall gleichmässig ausfüllt. Infolge ihrer überaus feinen Natur durchdringt sie frei und ungehindert selbst die dichtesten Stoffe, welche z. B. auf unserer Erde anwesend sind. Diese Art Flüssigkeit ist identisch mit jenem, den ganzen, sonst leeren Weltraum erfüllenden Medium, welches schon seit langer Zeit als Träger der Lichterscheinungen angesehen wird und welches die Physiker Äther nennen. Wenn nun auch demnach Elektrizität überall vorhanden ist, so ist damit noch lange nicht gesagt, dass sie überall Wirkungen hervorbringen muss, durch welche den menschlichen Sinnen ihre Anwesenheit sich ankündet. Die Elektrizität

ist nur in bestimmten Zustandsformen für den Beobachter erkennlich, welche wiederum ihre Daseinsmöglichkeit der eigenthümlichen Art, in welcher die Elektrizität im Weltraum ausgebreitet zu denken ist, verdanken. Während ein Ozean von Wasser in seinen Massen eine grosse Bewegungsfreiheit besitzt, ist der unermessliche Ozean von Elektrizität in seiner Bewegungsfreiheit gehemmt; die Elektrizität ist gleichsam in die feinen Bläschenräume einer elastischen Gallerte eingeschlossen. Infolge dieser festhaltenden Eigenschaft der Gallerte bildet dieselbe einen Isolator für die Elektrizität. Wirken mechanische Kräfte auf die Elektrizität ein, so können ihre Wirkungen die Elektrizität weder im Volumen verringern — denn sie ist unzusammendrückbar — noch in Bewegung versetzen, sondern nur die elastischen Zellwände der Gallerte anspannen. Diese Zwangszustände der isolirenden Gallerte, oder des Dielektrikums, wie dieselbe die Physiker zu benennen pflegen, ist eine der Zustandsformen der Elektrizität, in welcher sie dem Beobachter ihr Dasein ankündet. Das grosse Gebiet der ruhenden oder statischen Elektrizität umfasst sämmtliche Erscheinungen, welche mit diesen Zwangszuständen im Dielektrikum zusammenhängen.

Sind die auf die Elektrizität einwirkenden mechanischen Kräfte grösser als die Elastizität der Gallerten-Zellwände, dann zerreissen dieselben und die Elektrizität kann sich unter dem Einfluss der Kräfte fortbewegen. Kleine Funken- und mächtige Blitzentladungen sind die sichtbaren Zeichen derartiger Zerreissungen des Dielektrikums. Eine dauernde Fortbewegung der Elektrizität innerhalb der Gallerte ist möglich, wenn dieselbe bleibende Risse oder Öffnungen aufweist, welche eine in sich geschlossene Röhre ausmachen und wenn die mechanischen, Elektrizitätsbewegung verursachenden Kräfte fortwährend vorhanden sind. Die Röhre ermöglicht die Fortleitung der Elektrizität, sie ist demnach ein Leiter für die Elektrizität. Nur wenn dieser Leiter in sich geschlossen ist, ist eine dauernde Elektrizitätsleitung möglich. Mündet er mit freien Enden im Dielektrikum, dann kann höchstens eine Spannungen ausgleichende Verschiebung der Elektrizität, aber kein dauerndes Fliessen stattfinden. Das beste Dielektrikum bildet der das Weltall umfassende Raum und die die Erde umgebende Atmosphäre; den besten Leiter die

Metalle. Dass die Elektrizität in so feinen Substanzen, wie Luft, zurückgehalten wird, in so dichten, wie Metalle, sich hingegen frei bewegen kann, ist eine ihrer merkwürdigsten Eigenschaften. Eine dauernde Elektrizitätsleitung ist des weitern, wie bereits bemerkt, nur möglich, wenn ständig eine treibende Ursache vorhanden ist. Vorrichtungen, welche hiefür besorgt sind, nennt man Elektrizitätsquellen. In diesen Quellen wird, entgegen den herkömmlichen Vorstellungen, die Elektrizität nicht erzeugt, sondern nur in Bewegung versetzt. Entnommen wird sie dazu dem umgebenden Dielektrikum. Der Vorgang in der Quelle besteht lediglich in der Abgabe der Energie der Bewegung, welche die Materie besitzt, an die Elektrizität. Die Bewegungsenergie kann an ausgedehnte Massen (elektrische Maschinen), oder an die kleinsten Teilchen, an die Moleküle einer Masse (Thermosäulen), gebunden sein; oder sie kann ihr Dasein der Wahlverwandtschaft der Elementenatome (Galvanische Elemente und Akkumulatoren) verdanken. Die den geschlossenen Leiter durchfliessende Elektrizität gibt ihre von der Elektrizitätsquelle empfangene Energie der Bewegung wieder ab und zwar entweder an die kleinsten Teilchen des Leiters — derselbe erwärmt sich, unter Umständen bis zur Lichtausstrahlung — oder an bewegbare, ausgedehnte Massen (Elektromotoren), oder an die verbundenen Atome wahlverwandter, chemischer Elemente, dieselben dadurch zur Trennung zwingend (Elektrolyse). Das Fliessen der Elektrizität ist die zweite Zustandsform und zwar weitaus die wichtigste, durch welche sich die Elektrizität dem Forscher offenbart. Sie macht das Gebiet der strömenden Elektrizität aus. Die technischen Errungenschaften der Elektrizität haben ihr Wirkungsprinzip fast ausschliesslich in dieser Zustandsform.

Zwei weitere, der Beobachtung zugängliche Zustandsformen der Elektrizität sind die Wirbel- und die Wellenbewegung. Der Wirbelbewegung ist nicht nur die Elektrizität in den Leitern, sondern auch die in den feinen Bläschenräumen der elastischen Gallerte unterworfen. Die Erfahrung zeigt auch, dass man bei Vorgängen, denen Elektrizität in Wirbelbewegung zugrunde liegt, die mit denselben verknüpften Erscheinungen nicht im Leiter, sondern in der Umgebung desselben, also hauptsächlich im Dielektrikum, zu suchen hat. Die Zustandsform der Wirbelbewegung

umfasst das Gebiet der rotirenden Elektrizität, oder des Magnetismus. Der geistvolle englische Experimentator Michael Faraday hat durch die Schöpfung des Begriffes der Kraftlinien und der Kraftlinienfelder der wissenschaftlichen Welt ein Hülfsmittel hinterlassen, durch das sich eine genaue Untersuchung und Erforschung der Zwangszustände in dem einen Magneten, oder einen stromdurchflossenen Leiter umgebenden Dielektrikum möglich macht.

Die Wellenbewegung der Elektrizität ist eine Bewegung, welche sich ungehindert durch das ganze Weltall ausbreiten kann. Das Dielektrikum ist ihr kein Hinderniss. Ein grosser Teil der hierher gehörigen Erscheinungen ist schon lange geistiges Eigenthum der Gelehrtenwelt, wenn auch unter der Flagge »Licht«. Es ist dies die einzige Zustandsform der Elektrizität, für welche im Auge ein Sinnes-Organ zur direkten Beobachtung vorhanden ist. Bekannt ist dieselbe demnach schon sehr lange, erkannt aber erst seit neuerer Zeit. Die wunderbaren, von dem Physiker Heinrich Hertz angestellten Experimente auf dem Gebiete der Wellenbewegung der Elektrizität, gestatteten zum ersten Male einen Einblick in das so ausserordentlich dunkle und schwierige Gebiet der strahlenden Elektrizität. Es enthält die letzte Zustandsform der Elektrizität, in welcher sie von dem Beobachter durch die damit verknüpften Wirkungen wahrgenommen werden kann.

Damit wäre die Darstellung »in groben Zügen« der modernsten Anschauung über Elektrizität gegeben. Dieselbe dürfte sehr geeignet sein, dem Studium des Nachfolgenden einen etwas wie idealen Schwung zu geben; eine Möglichkeit, welche dem Verfasser nur sehr willkommen sein kann, da der Gegenstand des Werkchens, der Natur der Sache nach, manchmal eine trockene Behandlung erfahren muss, wenn die Klarheit nicht notleiden soll.

Von allen den Einrichtungen, welche der Elektrizität zu einer so glänzenden und vielseitigen Rolle im modernen Kulturleben verholfen haben, erhält der Leser am besten eine richtige Anschauung, wenn er sich die Elektrizität als eine fliessende Flüssigkeit vorstellt. Die Kenntniss der Natur dieser Flüssigkeit ist zur Beurteilung der qualitativen und quantitativen Leistungen dieser Einrichtungen, sowie zur Bildung der gebräuchlichen Grundbegriffe von keiner Bedeutung. Diese Vernach-

lässigung der Naturergründung der Elektrizität ist nicht etwa eine besondere Eigenthümlichkeit der Elektrotechnik. Sie ist in allen jenen Zweigen der Technik vorhanden, wenn auch manchmal mit Einschränkungen, welche sich mit Naturkräften und ihrer Ausnutzung in maschinellen Einrichtungen befassen. Ein Wasser- oder Dampfkrafttechniker wird z. B. aus der Kenntniss der chemischen Zusammensetzung des Wassers bezw. des Dampfes für seine Zwecke wenig schöpfen können. Dahingegen ist für ihn die Kenntniss der Menge des ihm zur Verfügung stehenden Wassers, bezw. Dampfes, ferner des Gefälles, bezw. des Druckes und die körperliche, sowie räumliche Gestalt der Bahn, innerhalb welcher das Wasser, bezw. der Dampf, sich bewegt, von höchster Bedeutung. In einer ähnlichen Lage befindet sich der Elektrotechniker. Zur Beurteilung des Wesens und der Leistungsfähigkeit der von ihm geschaffenen Einrichtungen genügt die Vorstellung einer fliessenden Flüssigkeit und die Kenntniss ihrer Menge, sowie der treibenden Kraft und der räumlichen und körperlichen Gestalt der Bahn, innerhalb welcher die Elektrizität fliesst. Die Handhabung alles Dieses bedingt die Schaffung einer Anzahl Grundbegriffe, welche für die Sprache der Elektrotechnik dieselbe Bedeutung besitzen, wie das Alphabet für die Zungensprache des Menschen.

Die Elektrizität in der Form der fliessenden Flüssigkeit hat die ausdrucksvolle Bezeichnung elektrischer Strom erhalten. Dieser Strom wird dann existiren, wenn eine Bahn vorhanden ist, entlang welcher er fliessen kann. Ohne diese Bahn ist die Elektrizität gezwungen, bewegungslos den Raum auszufüllen. Hat die Bahn an irgend einer Stelle ein Ende, so kann sie noch so lang sein, einmal wird der elektrische Strom ihr Ende erreichen und sofort ist dann dem Fliessen der Elektrizität ein Ziel gesetzt. Den elektrischen Strom in einer Bahn dauernd im Fliessen zu erhalten, wäre wohl möglich, wenn man die Bahn mit der Eigenschaft der unendlichen Länge begaben könnte; ein Wunsch, den zwar die menschliche Phantasie, nie aber die Elektrotechnik zu erfüllen imstande ist. Glücklicherweise gibt es noch eine andere Möglichkeit, den Strom dauernd fliessen zu lassen. Sie ist ausserordentlich leicht zu verwirklichen. Die Bahn ist einfach räumlich so zu gestalten, dass sie wieder zu ihrem Aus-

gangspunkte zurückkehrt, dass sie also in sich geschlossen ist. In einer solchen Bahn wird der Strom auch dauernd fliessen. Obwohl eine derartige, in sich geschlossene Bahn in den meisten Fällen der Praxis nichts weniger als das Aussehen jenes Gebildes hat, das man in der Sprache der Geometrie Kreis zu nennen pflegt, so ist ihr doch diese Benennung allgemein gegeben worden und zwar in der etwas erweiterten Form Stromkreis. Die Bezeichnung Stromkreis bleibt auch dann noch für die Bahn des elektrischen Stromes bestehen, wenn diese zwar in sich zurückläuft, aber an irgend einer Stelle eine Unterbrechung besitzt. Einen solchen Stromkreis nennt man einen geöffneten, zum Unterschied von dem Stromkreis ohne Unterbrechung, welcher die Bezeichnung geschlossener Stromkreis führt. Aus alledem folgt die wichtige, fundamentale Thatsache: Nur in einem geschlossenen Stromkreise ist ein dauernder elektrischer Strom möglich. Diese Thatsache ist anundfürsich so einfach und findet so häufige Anwendung, dass sich der Mann vom Fache so wenig dabei denkt, wie der Mann der Alltäglichkeit, wenn er einen Stein zur Erde fallen sieht. Und doch stecken hinter diesen Dingen weittragende Naturgesetze!

Bezüglich der körperlichen und räumlichen Ausgestaltung des Stromkreises hat die Erfahrung und das Experiment eine grosse Anzahl Erkenntnisse und Gesetze gezeitigt, deren Bedeutung im Nachfolgenden, dem Rahmen des Werkchens entsprechend, dem Verständniss des Lesers nahegerückt werden soll. Es wurde vor allem festgestellt, dass alle Körper, welche die Natur kennt, die Fähigkeit besitzen, Bestandteile des Stromkreises auszumachen und als solche den Strom zu führen; dass aber diese Fähigkeit bei den verschiedenen Körpern ausserordentlich verschieden ausgebildet ist. Metalle leiten z. B. den Strom ausserordentlich leicht fort, Kohle und gewöhnliche Erde schon schwerer, während Luft, Glas und Porzellan der Leitung des Stromes ausserordentliche Schwierigkeiten bereiten. Bei den letztgenannten Körpern sind schon abnorme Bewegungsantriebe für die ruhende Elektrizität erforderlich, um sie, auch nur in äusserst geringen Mengen, in solchen Bahnen zum Kreisen zu bringen. Ja man betrachtet diese Stoffe in der Elektrotechnik überhaupt als unfähig, dauernde Ströme zu führen und kennzeichnet sie durch den

Namen Isolatoren. Stoffe, wie die Metalle, Kohle und Erde werden hingegen als Leiter bezeichnet, und bleibt es Jedermann unbenommen, Metalle als gute, Kohle als mittelgute, Erde oder Holz als schlechte Leiter zu klassifiziren. Ohne dieses verschiedene Verhalten der Isolatoren und Leiter wäre die Führung des elektrischen Stromes nach bestimmten Orten für den Elektrotechniker ein unlösbares Problem. Die oft kilometerlangen Leitungen einer elektrischen Stromversorgungsanlage würden so gut wie keinen Strom an ihr Endziel gelangen lassen, sondern denselben schon unterwegs nach allen Richtungen abgeben, wenn die Luft die Elektrizität nicht so ausserordentlich schwer fortleitete, und wenn nicht ein Abfliessen nach der Erde durch die Porzellanträger der Freileitungen oder den Gummimantel der Kabel verhindert würde. Gemäss diesen Betrachtungen leuchtet schon jetzt ein, welche Gesichtspunkte der Elektrotechnik bei der Auswahl eines geeigneten Leitungsmateriales massgebend waren. In erster Linie musste die Möglichkeit, ohne Schwierigkeiten dauernde Ströme zu führen, in Erwägung gezogen werden, dann ein nicht allzuhoher Materialwert, ferner genügende Widerstandsfähigkeit gegen die hier in Frage kommenden äusseren Einflüsse und die leichte Verarbeitung des Materiales in die geeigneten Formen. Es war dem Kupfer vorbehalten, diesen vielseitigen Wünschen der Elektrotechnik am weitgehendsten gerecht zu werden. Die Firma Aron Hirsch in Halberstadt hat eine Statistik über den Kupferverbrauch in Deutschland herausgegeben, wonach auf das Jahr 1891 und 92 57000 Tonnen, auf 1893 60500 Tonnen, auf 1895 71000 Tonnen und auf 1896 86000 Tonnen entfallen. Die Zunahme an verbrauchtem Kupfer ist demnach in 5 Jahren um rund 50 % gestiegen, was lediglich der in diesen Jahren sich hochentwickelnden Elektrotechnik zuzuschreiben ist und besser wie Worte für die eminente Bedeutung dieses Materiales als Leiter der Elektrizität spricht. Die ganze rechnerische und entwerfende Thätigkeit des Mannes vom Fache ist bereits mit diesem Materiale so verquickt, dass ein plötzliches Ausbleiben desselben im Haushalte der Natur die durchgreifendsten Umwälzungen hervorzubringen im Stande wäre. Dieselbe Einschränkung, wie in der Wahl des Stoffes, erfährt der Leiter auch in Bezug auf seine Formgebung. Es liegt kein Grund vor,

warum ein Körper, wenn er überhaupt leitet, dies nicht in jeder beliebigen Form thun soll, und doch hat die Elektrotechnik fast nur eine Körperform, als für ihre Zwecke am brauchbarsten, angenommen. Fast in allen den Einrichtungen, welche den Inhalt dieses Werkchens ausmachen, hat der den elektrischen Strom führende Teil Drahtform erhalten. Kupferdraht, blanker wie isolirter, ist demnach das wichtigste Material für den Bau elektrischer Anlagen.

Bei jedem Stromkreise und mag er so unübersichtlich und komplizirt sein wie er nur will, kann man drei, bezgl. ihres Zweckes sehr charakteristische Teile unterscheiden. Der erste dient dazu, die Elektrizität stetig in Bewegung zu erhalten, sie gleichsam immer von neuem zu erzeugen. Man nennt diesen Teil Stromquelle. Der zweite dient dazu, die Fähigkeit der Elektrizität, alle Arten von Energien — wie Licht, Wärme oder mechanische Energie — abzugeben, nutzbar zu machen; er kann Nutzapparat genannt werden. Der dritte dient dazu, Stromquelle und Nutzapparat in Verbindung zu bringen; Verbindungsleitung ist die Bezeichnung für diesen Teil. Die Dynamomaschinen rechnen zum ersten, Elektromotoren, Glüh- und Bogenlampen zum zweiten, das Leitungsnetz zum dritten Teile.

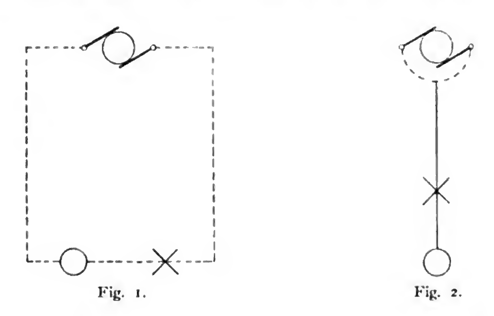


Fig. 1. Fig. 2.

Für den Projekteur elektrischer Anlagen ist es wichtig, sich bei der Bearbeitung von Leitungsplänen gewisser einfacher Bezeichnungen für die verschiedenen Teile der Stromkreise bedienen zu können. Je allgemeiner die Gültigkeit dieser Be-

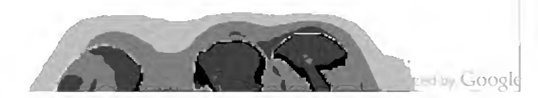
zeichnungen ist, desto wertvoller sind sie. Die Bestrebungen des Verbandes deutscher Elektrotechniker, in seinen Sicherheitsvorschriften solche einheitlichen Bezeichnungen zu schaffen, sind daher durch Anwendung derselben zu unterstützen. Diesen Bezeichnungen zufolge kann man einen einfachen Stromkreis, bestehend aus Dynamomaschine, Glüh- und Bogenlampe, sowie den Verbindungsleitungen, auf zweierlei Weise darstellen. Die getrennte Darstellung der Fig. 1 hat den Vorzug der grösseren Korrektheit, die vereinigte der Fig. 2, den der Einfachheit. Bei Entwürfen von Leitungsplänen ist das letztere Verfahren wohl allgemein üblich geworden.

Die Möglichkeit des dauernden Fliessens der Elektrizität ist, wie die bisherigen Betrachtungen gezeigt haben, an das Vorhandensein eines aus Leitern gebildeten Stromkreises gebunden. Sie hängt aber noch von einem weiteren Umstand ab. Die Elektrizität besitzt wohl die Fähigkeit sich zu bewegen, aber sie bedarf, um in diesen Zustand zu gelangen, einer antreibenden Kraft. War diese Kraft eine Zeit lang in Thätigkeit getreten, dann behält die Elektrizität, nach dem Gesetze der Trägheit, die ihr durch dieselbe erteilte Bewegung bei; in Stromkreisen jedoch nur unter der Voraussetzung, dass sich ihr nichts entgegensetzt, was die Bewegung zu hemmen versucht. Nun besitzt aber der Stromkreis ein Etwas in seinen Leitern, das hemmend auf die Bewegung der Elektrizität einwirkt. Dieses Etwas heisst Widerstand. Dass der Leiter dem elektrischen Strom Widerstand entgegensetzt, darf nicht sehr verwundern; zeigen doch die modernen Anschauungen, dass man sich das Fliessen der Elektrizität etwa wie das Fliessen von Wasser in einer mit Sand und Kies gefüllten Röhre vorzustellen hat. Dass es dabei nicht ohne Hemmungen abgehen kann, ist auch dem ungeschultesten Geiste fassbar. Durch den Widerstand der Leiter wird die in Bewegung versetzte Elektrizität demnach sehr bald wieder in den Zustand der Ruhe übergeführt. Die Erzielung eines dauernden Stromes ist nur möglich, wenn die antreibende Kraft dauernd zur Wirkung kommen kann und wenn sie gleich oder grösser als die gegenwirkende Kraft ist, welche der Leiterwiderstand verkörpert. Die Kraft, welche die Elektrizität in Bewegung versetzt und auch dauernd in dieser erhält, nennt man elektromotorische Kraft.

Statt dieses etwas langatmigen Ausdruckes hat sich in der Elektrotechnik der Ausdruck Spannung eingeführt. Die Wahl dieses Ausdruckes ist nicht sonderlich zu loben, da eine Spannung immer nur die Wirkung einer Kraft, niemals aber die Kraft selbst sein kann. Es ist die Aufgabe der Stromquelle, diese elektromotorische Kraft oder Spannung dauernd zu erzeugen; sie erledigt sich derselben, indem sie, auf bisher noch sehr ungenügend erforschte Weise, mechanische oder chemische oder kalorische Kräfte in elektromotorische umwandelt. Die Stromquellen sind demnach keine Stromerzeugervorrichtungen, wie anzunehmen immer sehr viel Geneigtheit vorhanden ist, sondern Vorrichtungen für Kräfteumwandlungen.

Die verschiedenartigen Bestandteile, aus denen ein elektrischer Stromkreis zusammengesetzt ist, bedingen einen entsprechend verschiedenen Widerstand desselben. Demnach wird auch die mit jedem Widerstand verknüpfte Bewegungshemmung an den verschiedenen Stromkreisstellen eine ungleiche Grösse aufweisen, und die sie überwindende Spannung wird sich mit ungleichen Beträgen bethätigen. Dem grösseren Widerstand wird z. B. ein grösserer, dem kleineren ein kleinerer Betrag der gesammten Spannung in dem Stromkreise entgegengesetzt. Es ist ohne Zweifel von grosser Bedeutung, Kenntniss von der quantitativen Inanspruchnahme der gesammten Spannung in den Teilen des Stromkreises zu besitzen. Diese Kenntniss wird mit Zuhilfenahme der nachfolgenden Vorstellung, die zwar der vollen Wirklichkeit nicht entspricht, im übrigen aber unbedenklich aufgegriffen werden kann, leicht ermöglicht.

Zur Bewegung eines bestimmten Elektrizitätsquantums wirkt in der Stromquelle eine bestimmte Spannung und zwar in der Richtung, in der die Elektrizität fliesst. Wird ein Stück des Stromkreises entfernt, und der übrig bleibende Teil wieder geschlossen, dann entfällt der diesem Stück entsprechende Widerstand; mithin muss aber auch die Spannung kleiner werden, wenn durch den neuen Stromkreis dasselbe Elektrizitätsquantum fliessen soll, wie durch den ursprünglichen. Der Aenderungsbetrag der Spannung entspricht dem Spannungsanteil, der dem ausgeschalteten Widerstand zukommt. Dieselbe Betrachtung gilt für jedes weitere Stück, um das der Stromkreis gekürzt wird und



sie führt endlich dazu, das Wirken der Spannung in der Stromquelle so aufzufassen, wie wenn sie nicht allein dort, sondern in dem ganzen Stromkreise die Elektrizität bewegungsversuchend angriffe und zwar in Teilbeträgen, die um so kleiner werden, je weiter der jeweilige Angriffspunkt von der Ausgangsstelle der Stromquelle abliegt. In der Stromquelle ist demnach die Spannung am grössten, sie nimmt längs des Stromkreises ab und wird Null an dem den Stromkreis schliessenden Ende, welches ebenfalls in der Stromquelle liegt. Gemäss diesen Entwicklungen ist es jetzt ein Leichtes, die auf die einzelnen Teile eines Stromkreises entfallenden Spannungsbeträge festzustellen. Sie sind offenbar dem Grössenunterschied der Spannung am Anfang und am Ende des betreffenden Stromkreisteiles gleich. Für diesen Unterschied hat sich allgemein der zweckentsprechende Ausdruck Spannungsabfall eingebürgert. Die Kenntniss des Spannungsabfalles ist für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Stromkreisteile unumgänglich notwendig. Der interessirte Leser hat alle Ursache, gerade diesen Teil durch gehöriges Selbstdurchdenken in Fleisch und Blut übergehen zu lassen. Es wird ihm das wesentlich erleichtert, wenn er sich diese Betrachtungen zu verbildlichen sucht,

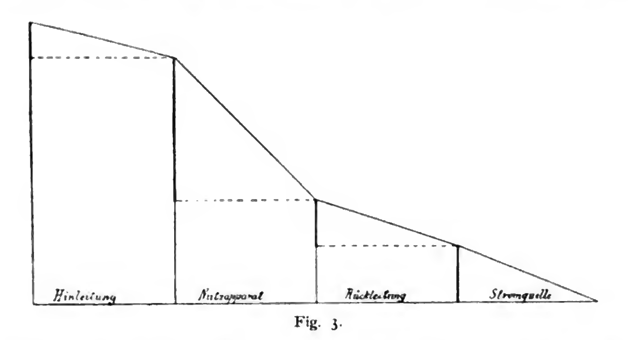


Fig. 3.

etwa in der folgenden Weise: Die einzelnen Stromkreisteile werden durch horizontale gerade Linien, die entsprechenden Spannungen durch vertikale gerade Linien dargestellt. Die verschiedene Länge der Vertikalen kennzeichnet die verschiedene Grösse der Spannung

in den einzelnen Stromkreisteilen. Die gleichlangen Horizontalen werden aneinandergereiht — sie entsprechen in dieser Anordnung dem geöffneten Stromkreise — und in ihren Endpunkten die zugehörigen Vertikalen errichtet. Fig. 3 zeigt eine derartige Verbildlichung. Nicht nur das Verkleinern der Spannung längs des Stromkreises anundfürsich, sondern auch der Schnelligkeitsgrad des Verkleinerns kann darin sehr hübsch übersehen werden; bestimmend hiefür ist die Neigung der schrägen Geraden. Die gestrichelten Linien schneiden auf den Vertikalen die dicker hervorgehobenen Strecken ab, welche die Spannungsabfälle der entsprechenden Stromkreisteile darstellen.

Da die Verschiedenheit der Widerstände der einzelnen Stromkreisteile durch entsprechend grosse Beträge der gesammten Spannung berücksichtigt wird, so ist daraus für die auf den Stromkreis verteilte Elektrizitätsmenge die Folgerung zu ziehen, dass sie überall denselben Bewegungsimpuls zum dauernden Fliessen erhält. Es könnte nun die Möglichkeit gegeben sein, dass sich die Elektrizität ungleichmässig auf den Stromkreis verteilte, so dass an einer Stelle viel, an der andern wenig Elektrizität vorhanden wäre. Was würde die Folge davon sein? Dieselben Bewegungsimpulse würden verschieden grosse Elekrizitätsmengen im Fliessen erhalten; eine grosse Menge müsste sich daher verhältnissmässig langsam, eine kleine verhältnissmässig schnell fortbewegen; es würde an einzelnen Stellen zu Stauungen, an andern zu Unterbrechungen der Elektrizität kommen. Das sind aber Erscheinungen, von denen in Wirklichkeit im Stromkreise nichts zu beobachten ist. Es ist daraus zu folgern, dass sich die Elektrizität *gleichmässig* auf den Stromkreis ververteilt, *der elektrische Strom also überall von derselben Stärke ist.* Die Bestätigung dieser Folgerung ergibt das Experiment. Vorrichtungen zum Strommessen, an verschiedenen Stellen eines Stromkreises eingeschaltet, zeigen in einem bestimmten Zeitabschnitte dieselbe Elektrizitätsmenge an.

Wie z. B. bei einer Turbine die Leistungsfähigkeit nicht nur von dem Gefälle, sondern auch von der Wassermenge abhängig ist, so ist auch bei den elektrischen Einrichtungen für die Leistungsfähigkeit nicht nur die Spannung bezw. der Spannungsabfall, sondern auch die Elektrizitätsmenge massgebend. Diese

Thatsache sei hier angeführt, um die Bedeutung der Strommenge zu kennzeichnen. Die Schaffung eines zur Beurteilung von Elektrizitätsmengen hinreichenden Begriffes war für die Elektrotechnik eine Angelegenheit von grosser Wichtigkeit. Selbstverständlich können zur Beurteilung von fliessenden Strommengen immer nur gleiche Zeiträume herangezogen werden und ist als zweckmässigster die Sekunde angenommen worden. Die Elektrizitätsmenge, welche in einer Sekunde durch einen beliebigen Querschnitt des Leiters fliesst, ist die Menge, welche der Elektrotechniker Vergleichen unterzieht. Er nennt sie kurzweg Stromstärke. Unter Zugrundelegung der Stromstärke ist es ein Leichtes, Strommengen, welche in beliebig grossen Zeitabschnitten einen Querschnitt des Stromkreises passiren, zahlenmässig festzustellen. Die Stromstärke, mit dem Zeitabschnitt vervielfacht, gibt ein korrektes Maass für die in Frage kommende Strommenge. Ob der Zeitabschnitt in Sekunden, Minuten oder gar Stunden zu messen ist, wird von dem Bedürfniss abhängig sein, keine übermässig grossen Zahlenwerte für die Strommengen zu erhalten. Bei Strommengen, wie sie in den in diesem Werkchen beschriebenen Einrichtungen aufzutreten pflegen, empfiehlt sich die Einführung einer grossen Zeiteinheit, z. B. der Stunde. Die Stunde hat sich auch thatsächlich hiefür in der Elektrotechnik Heimatsrechte erworben.

Solange die Spannung der Stromquelle immer in derselben Richtung wirkt, wird auch der den Stromkreis durchfliessende Strom immer dieselbe Richtung beibehalten müssen. Er bleibt gleichgerichtet und hat daher ein Anrecht darauf, den ihm von der Elektrotechnik verliehenen Taufnamen Gleichstrom zu tragen. Die Technik richtet jedoch an den Gleichstrom nicht allein die Forderung der steten Gleichrichtung, sondern auch die der steten gleichen Grösse der Spannung bezw. Stromstärke. Sind beide Forderungen vollkommen erfüllt, dann hat man einen Gleichstrom von idealen Eigenschaften. Die Spannung kann aber auch jeden Augenblick ihre Richtung ändern, womit eine jeweilige Aenderung der Fliessrichtung des elektrischen Stromes verknüpft ist. Ein solcher Strom ist durch den Ausdruck Wechselstrom ausgezeichnet charakterisirt. Dieser Wechsel der Spannung erfolgt jedoch im allgemeinen nicht in der Weise,

dass diese in ihrem ganzen Grössenbetrage plötzlich verschwindet und ebenso plötzlich in demselben Betrage wieder erscheint, aber in entgegengesetzter Richtung wirkend; sondern die Spannung nimmt allmählich auf Null ab und wächst allmählich auf ihren vollen entgegengesetzten Betrag an. Dieses Anwachsen und Abnehmen von Spannung und Stromstärke ist, wenn ein Bild herangezogen werden darf, am besten mit einer Wellenbewegung zu vergleichen. Es wäre daher ebenso passend, den Wechselstrom als Wellenstrom zu bezeichnen. In der Art und in der Geschwindigkeit mit der Spannung und Stromstärke ihre fortdauernden Grössenänderungen durchführen, ist eine grosse Mannigfaltigkeit vorhanden; die Wechselströme, die den verschiedenen Stromquellen der Praxis entstammen, sind in den seltensten Fällen gleich, wohl aber meistens sehr unterschiedlich geartet. Unzweifelhaft muss das Naturstudium dieser Wechselströme für den Techniker von grossem Belang sein; ohne dessen Beherrschung ist er kaum im Stande, das Wesen und Wirken von Wechselstromeinrichtungen voll und ganz zu ergründen. Mit der Möglichkeit, in jedem Zeitpunkt die Grösse und Richtung der Spannung und der Stromstärke zu erkennen, ist das Endziel der Erforschung erreicht. Es genügt an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass von der Praxis Mittel und Wege gefunden wurden, um dahin zu gelangen; die Kennenlernung des Hülfsmittels, die den verschiedenen Zeitpunkten entsprechenden Spannungs- und Stromstärkenwerte im Ganzen zu übersehen, ist hier wichtiger. Dieses Hülfsmittel besteht in der zeichnerischen Wiedergabe dieser Werte und zwar in der Reihenfolge in der sie zeitlich aufeinanderfolgen. Um dieses zu ermöglichen, ist es erforderlich, die in Betracht kommende Spanne Zeit als ein geometrisches Gebilde darzustellen und zwar entweder als eine gerade Linie oder als einen Winkel. Beides ist üblich; die Darstellung als Gerade verdient für die vorliegenden Zwecke den Vorzug. Diese Gerade, die Zeitlinie, wird in eine zweckentsprechende Anzahl kleiner Teile geteilt und in den Endpunkten dieser, in den Zeitpunkten, Senkrechte errichtet. Diese Senkrechten entsprechen den Spannungs- und Stromwerten, die nach Ablauf der einzelnen Zeitabschnitte vorhanden sind. Durch die Länge dieser Senkrechten wird die Grösse und durch die Lage auf der einen

oder andern Seite der Zeitlinie, die verschiedene Richtung von Spannung und Strom angezeigt. Durch Verbinden der freien Enden der Senkrechten wird eine stetige Linie erhalten, die die Uebersicht der zeitlichen Aenderung des Wechselstromes wesentlich erleichtert.

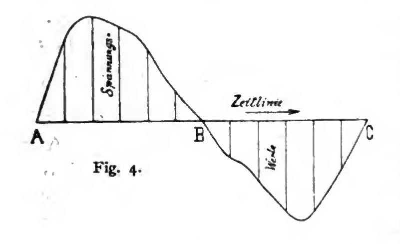


Fig. 4.

Fig. 4 gibt die auf diese Weise ausgeführte bildliche Darstellung einer Wechselstromspannung wieder. Sie erstreckt sich über den Zeitabschnitt, der verstreicht, bis die Spannung, vom Nullstadium angefangen, alle ihre Werte durchlaufen hat, also wieder zum Nullstadium zurückgekehrt ist. Gleiche oder ähnliche Linienzüge lassen sich links oder rechts auf der Zeitlinie fortsetzen. Die linken verkörpern den Wechselstrom, der der Vergangenheit angehört; die rechten den, der noch erst zu erwarten ist. Da sie in ihrer Form nichts wesentlich Neues darbieten, so genügt zum Studium das Herausgreifen eines einzigen, aber vollständigen Linienzuges. Dieser soll zukünftig die Bezeichnung Welle führen. Der einer Welle entsprechende Zeitabschnitt, also in Fig. 4 die Strecke AC, heisse Periode und die verschiedenen, während derselben auftretenden Spannungs- bezw. Stromstärkenwerte, Phasen der Spannung bezw. der Stromstärke. Es ist für den technischen Wechselstrom charakteristisch, dass, wie auch Fig. 4 zeigt, der Zeitabschnitt, zur Durchlaufung der Phasen in dem einen oder dem andern Richtungssinne, von gleicher Grösse bleibt. Während der einen halben Periode, also längs der Strecke AB, werden senkrecht nach oben gerichtete, während der andern halben Periode, also längs der Strecke BC, senkrecht nach unten gerichtete Phasen hervorgebracht. Es ist das eine Eigenthümlichkeit, die ihre Begründung lediglich in der Art zu suchen hat, in der in den gebräuchlichen Wechselstromquellen Ströme erzeugt werden. Diese ist auch Ursache der weitern Eigenthümlichkeit, dass sich zwar bei einer im Beharrungszustande befindlichen Wechselstromeinrichtung, je nach der

jeweiligen Beanspruchung, wesentliche Aenderungen in der Form der Wellen und der Grösse der Phasen einstellen, nie aber solche in Bezug auf die Grösse der aufeinanderfolgenden Perioden. Diese bleiben innerhalb enger Grenzen von gleichem Betrage. Die Kenntniss der Periodengrösse ist für den Techniker von grossem Belang. Es besteht die Möglichkeit, Wechselströme mit Perioden von recht verschiedener Länge erzeugen zu können; in Wirklichkeit ist jedoch die Länge sehr eng begrenzt geblieben, sie erreicht ungefähr $\frac{1}{25}$ bis $\frac{1}{50}$ Sekunde. Auf eine Sekunde treffen dementsprechend 25 bis 50 Perioden. Diese sekundliche Anzahl heisse Periodenzahl (in der Technik wird dafür öfters der Ausdruck Frequenz benützt), und das doppelte derselben, Wechselzahl. Wechselzahl deshalb, weil diese Zahl, wie leicht einzusehen, einen Aufschluss über die auf die Sekunde treffende Menge Richtungswechsel der Spannung bezw. der Stromstärke gibt.

Bei der bereits hervorgehobenen Vielgestaltigkeit der erzeugbaren Wellen ist es eine schwierige Aufgabe, die den verschiedenen Wechselstromarten anhaftenden Allgemein - Eigenschaften und -Gesetze zu ergründen. Die Theorie hat sich aus dieser Verlegenheit in der Weise geholfen, dass sie ihre Betrachtungen an eine geometrisch verhältnissmässig einfach geformte Welle anknüpfte, die unter dem Namen Sinuswelle bekannt ist. Ein Wechselstrom dieser Art ist in der Fig. 5 verbildlicht. Die gewonnenen Resultate wurden dann Wechselströmen abweichender Wellenform, so weit als berechtigt, angepasst. Dass gerade die Sinuslinie als Urtypus der Wellen gilt, mag einesteils seinen Grund darin haben, dass die herkömmlicher Weise zu Lehrzwecken herancitirten Wechselstromquellen theoretisch Ströme mit regelrechten Sinuswellen ergeben; andernteils sich aber aus der längstbekannten Thatsache erklären, dass

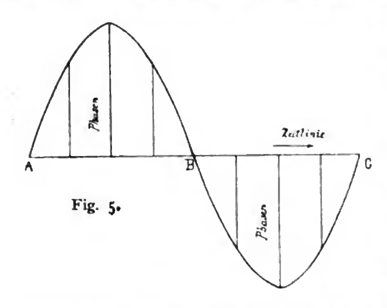


Fig. 5.

eine jede Welle, wie irgend sie auch geformt sein mag, sich in eine bestimmte Anzahl Unterwellen von zwar verschiedener Periode, aber von durchweg Sinusgestalt zerlegen lässt; dass mithin die Sinuswelle die Grundwelle, aus der sich alle andern kombiniren, darstellt.

Es ist ohne weiteres einleuchtend, dass sich bei Gleichstrom, infolge seines stetigen Charakters, eine Messung der Spannung oder der Stromstärke leicht ermöglichen lassen muss. Nicht dasselbe gilt für den Wechselstrom, da bei diesem sowohl die Spannung als auch die Stromstärke jeden Augenblick ihren Grössenwert ändern. Um bei dem Wechselstrom etwas Aehnliches wie bei dem Gleichstrom messen zu können, dazu gehören Messeinrichtungen, die nicht auf die Augenblickswerte reagiren, sondern nur einen einzigen Wert anzeigen und zwar den dem gleichwertigen Gleichstrom entsprechenden. Es sind zwei Eigenschaften des Wechselstromes, welche die Schaffung solcher Einrichtungen ermöglichen. Erstens das stete Wiederholen derselben Wellen und zweitens die Kleinheit der Perioden. Durch die stete Aufeinanderfolge gleicher Zustände ist das Auftreten eines einzigen Wertes an sich ermöglicht; durch die Kleinheit der Perioden wird dieses auch den Messvorrichtungen zukommen, indem der Zeiger der Vorrichtungen viel zu träge ist, um das zeitliche Spiel der Wellen mitmachen zu können und deshalb an einer bestimmten Stelle verharrt. Bei einer Ueberlegung hinsichtlich der Grösse der Phase, die dem Gleichstromwert entsprechen dürfte, ist der Schluss naheliegend, dass diese in dem Mittelwert der Summe aller gleichgerichteten Phasen einer halben Periode zu erkennen sein wird. Leider trifft diese Ueberlegung nicht ganz zu; es tritt noch eine Erschwerung ein, die spitzfindig genug ist, um anfänglich etwas Verwirrung in die Köpfe zu bringen. Die Normalmessvorrichtungen der Wechselstromtechnik, mit denen sämmtliche übrigen in der Technik Anwendung findenden Instrumente geaicht werden, besitzen einen festen und einen beweglichen Teil. In beiden kommt der Wechselstrom zur Thätigkeit. Seine Einwirkung auf den anzeigenden Teil ist aber damit keine einfache, sondern eine quadratische und dementsprechend sind auch dessen Angaben beeinflusst. Was dieser Umstand für beide Stromarten zu bedeuten hat, lässt sich am besten an einem einfachen Zahlenbeispiel klarlegen.

Ein Gleichstrom besitze die Stromstärke 2. In 3 aufeinander folgenden Zeitabschnitten bleibt diese stets gleich gross und ist der sich über die gesammte Zeit erstreckende Mittelwert $\frac{2+2+2}{3}$ ebenfalls 2. Werden die Einzelwerte ins Quadrat erhoben, dann ist der quadratische Mittelwert $\frac{2^2+2^2+2^2}{3} = 4$ und die Wurzel aus demselben $\sqrt{4}$ wiederum 2. Daraus geht hervor, dass bei Gleichstrom ein Unterschied zwischen einem einfach und einem quadratisch beeinflussten Instrument, in Bezug auf dessen Angaben, nicht besteht.

Ein Wechselstrom habe in 3 aufeinander folgenden Zeitabschnitten die Stromstärke 1, 2 und 4. Der sich für die gesammte Zeit ergebende Stromstärkemittelwert $\frac{1+2+4}{3}$ ist 2,33... Diese Zahl entspricht dem Mittelwert der Summe aller gleichgerichteten Phasen einer halben Periode und würde von dem quadratisch wirkenden Instrument nicht angezeigt werden. Werden die Einzelwerte quadrirt, dann ist der quadratische Mittelwert $\frac{1^2+2^2+4^2}{3} = 7$ und die Wurzel daraus, $\sqrt{7} = 2{,}64\ldots$, demnach nicht wie bei dem Gleichstrom dem erstgefundenen Mittelwert gleich, sondern *grösser* als derselbe. Der Wert 2,64 würde von der Messvorrichtung angezeigt werden; er entspricht demnach der Phase, die der Stromstärke des äquivalenten Gleichstromes gleichzusetzen ist. Dieser Wert, der sich, um seine allgemeine Definition zu geben, aus der Quadratwurzel des Mittelwertes der Quadrate aller gleichgerichteten Phasen einer halben Periode zusammensetzt, führt das Prädikat *effektiver*. *Effektive Spannung* und *effektive Stromstärke* sind die Grössen, mit denen der Wechselstromtechniker, analog seinem Kollegen, dem Gleichstromtechniker, messend operirt. Auf die Grundtype der Wellen, die Sinuslinie, zurückgreifend, lassen sich hiefür, allerdings in kurzer Weise nur bei Anwendung höherer Mathematik, die zahlenmässigen relativen Beziehungen zwischen der maximalen, der effektiven und der mittleren Phase entwickeln Diese ergeben, wenn der maximalen Phase die Grösse 1 zugeteilt wird, für die effektive Phase 0,707 und für die mittlere

0,637, also um rund 10 % weniger als für die effektive. Für andere, von der Sinuslinie abweichende Wellenformen, sind selbstverständlich auch diese Phasenverhältnisse andere; sie können um 30 und noch mehr Prozente differiren.

Die Elektrotechnik der Neuzeit hatte bei ihren Bestrebungen, brauchbare Wechselstrommotoren zu schaffen, sehr bald erkannt, wie ausserordentlich vorteilhaft hiezu zwei oder drei gleiche Wechselströme zu verwenden sind, welche zwar, soweit als erforderlich, in gesonderten Stromkreisen fliessen, aber gemeinsam in den Nutzapparaten zur Wirkung gelangen. Diese Erkenntniss gab die Veranlassung zur ausgedehnten Einführung dieser zusammengekuppelten Wechselströme in die Praxis und eine weitere, dritte Stromart, der Mehrphasenstrom, war damit geschaffen. Eine vollkommen neue Stromart in dem Unterscheidungssinne von Gleich- und Wechselstrom ist der Mehrphasenstrom nicht. Sein Charakteristikum besteht lediglich in der gleichzeitigen Verwendung mehrerer Wechselströme. Um den erkannten Vorteil des Mehrphasenstromes in den in Frage kommenden Einrichtungen auch wirklich zu erzielen, ist nicht nur ein Kuppeln der Ströme notwendig, sondern es müssen auch die Wellen der einzelnen Ströme zeitlich verschoben sein. An und für sich kann die zeitliche Verschiebung beliebig gross gewählt werden; die symetrische Gestaltung der einzelnen Bestandteile der Stromquelle und des Nutzapparates und das Bedürfniss der Erzielung einer möglichst hohen Leistungsfähigkeit bedingen jedoch die Einhaltung eines bestimmten Maasses für dieselbe. Bei Verwendung zweier gekuppelter Wechselströme, wie sie der Zweiphasenstrom besitzt, sind die Wellen um 1/4 Periode verschoben (Siehe Fig. 6); hingegen bei drei gekuppelten Wechselströmen, bei

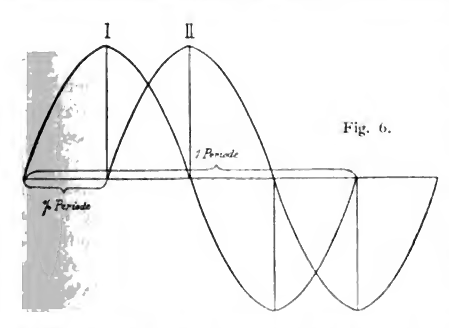


Fig. 6.

dem **Dreiphasenstrom**, oder wie er noch genannt wird, dem **Drehstrom**, um $^1/_3$ Periode (Siehe Fig. 7). Genau um denselben Betrag wie die Wellen, sind bei den gekuppelten Wechselströmen auch die entsprechenden Phasen verschoben. Darauf

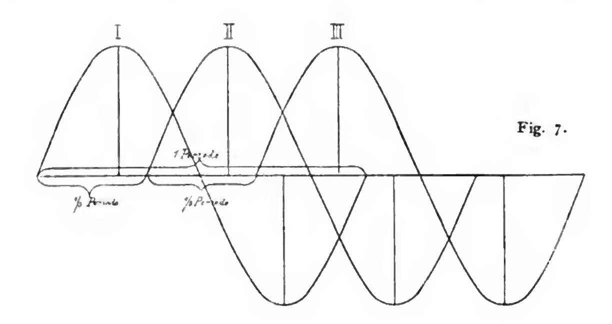


Fig. 7.

sei hingewiesen, weil in der Praxis der Ausdruck **Phasenverschiebung** weit gebräuchlicher ist, als der, Verschiebung der Wellen.

In der Geschichte der Elektrotechnik kann bezgl. der Verwendung der aufgezählten Stromarten ein eigenthümliches Faktum verfolgt werden. Als nach der Entdeckung des Prinzipes, aus mechanischer Bewegung elektrische Ströme zu erzeugen, die ersten schüchternen Versuche gemacht wurden, elektrische Maschinen zu bauen, worin dieses Prinzip eine praktische Verwendung finden sollte, da empfanden es die Physiker als eine sehr unangenehme Thatsache, dass diese Maschinen Wechselströme lieferten. Ausser physiologischen Kitzelversuchen wusste man mit den Wechselströmen nicht viel Gescheites anzufangen. Das ganze Streben war darauf gerichtet, Vorrichtungen zu ersinnen, durch welche diese Ströme zu idealen Gleichströmen umgewandelt werden konnten. Den wenigen Glücklichen, denen eine brauchbare Lösung gelungen war, hat sich die Nachwelt derart dankbar erwiesen, dass sie heute im Pantheon der elektrischen Halbgötter beinahe an oberster Stelle präsidiren. Erst mit den elektrischen Gleichstrommaschinen eines Grammes und Siemens' begann sich die

Elektrotechnik zu entwickeln und jahrzehntelang schwang der Gleichstrom das Szepter der Autokratie. Es fehlte zwar nicht an Anläufen, dem Wechselstrom das Gewand eines ebenbürtigen Konkurrenten anzulegen, aber alle Versuche scheiterten an dem Umstande, dass man der Trägheit der Elektrizität, welche bei den Wechselströmen eine grosse Rolle spielt und die sonderbaren Wirkungen der Selbstinduktion mitsichbringt, nicht gerecht zu werden vermochte. Erst die unterdessen in der Gleichstromtechnik erlangten Fortschritte und Einsichten wirkten rückläufig befruchtend auf die Technik des Wechselstromes; ganz allmählich wurde der Schleier der Geheimnisse gelüftet; ganz allmählich gewannen Wechselstromeinrichtungen Lebensfähigkeit und Boden. Gegenwärtig ist der Wechselstrom dem Gleichstrom ein gefährlicher Gegner geworden und wird ihn wohl, bei dem heutigen wirtschaftlichen Bestreben der weitgehendsten Zentralisation, mit der Zeit vollkommen überflügeln.

Abschnitt II.

Das Ohmsche Gesetz. Die elektrischen Einheiten. Der Widerstand in seiner Abhängigkeit von Form und Natur der Leiter. Beziehungen zwischen Spannungsabfall und Leiterquerschnitt. Hintereinander- und Parallelschaltung. Elektrische Arbeit, Leistung und Energie, Wirkungsgrad und Ausnützungsfähigkeit.

Auf Seite 11 im vorigen Abschnitt wurde erläutert, dass das dauernde Fliessen von Elektrizität in einem Stromkreis an das dauernde Vorhandensein einer den elektrischen Widerstand überwindenden und das Fliessen einleitenden Kraft gebunden ist. So bedeutend diese Thatsache an sich auch ist, kommt sie dem Praktiker doch erst dann voll und ganz zugut, wenn sie nach der quantitativen Seite eine Erweiterung und Klarstellung erfährt.

Schon ganz primitive, in dieser Richtung angestellte Experimente geben wichtige Aufschlüsse, indem sie erkennen lassen, dass z. B. in einem Stromkreis mit gleichbleibendem Widerstand höhere Stromstärken nur durch einen entsprechend grösseren Aufwand an Spannung zu erzielen sind; oder dass in einem Stromkreis mit sich vergrösserndem Widerstand eine annähernd gleichbleibende Stromstärke ebenfalls nur durch entsprechende Spannungserhöhung erreichbar ist. Diese Versuchsergebnisse beweisen klar und deutlich, dass sich die Spannung einer Stromquelle nicht nur nach dem Widerstand der Stromkreisteile, sondern auch nach der Elektrizitätsmenge, die der Strom enthalten soll, zu richten hat.

Die Wirkung des Widerstandes und der Stromstärke kann so aufgefasst werden, wie wenn der Spannung eine Gegenspannung das Gleichgewicht zu halten versuchte. Dieses Gleich-

gewicht ist immer vorhanden, wenn Widerstand und Spannung sich in ihrer Grösse nicht mehr ändern; stets ist dann:

Spannung = Gegenspannung.

Die Kenntniss von der Art, wie sich die Gegenspannung aus der Stromstärke und dem Widerstande zusammensetzt, ist für den Elektrotechniker von grösster Wichtigkeit. Der Physiker Simon Ohm[1]) hatte sich schon vor 70 Jahren als Erster mit dem Erlangen dieser Kenntniss beschäftigt. Auch ihn führte einzig und allein das Experiment zum Ziele. Ohm zeigte durch dasselbe, dass die Gegenspannung dem Produkte aus Stromstärke und Widerstand gleichzusetzen ist, damit aber auch, dass die

$$\text{Spannung} = \text{Stromstärke} \times \text{Widerstand}$$

ist. Eine einfachere quantitative Beziehung zwischen den drei wichtigsten Grössen des elektrischen Stromkreises konnte sich der Elektrotechniker kaum wünschen. Um dem Entdecker seinen Dank für dieses königliche Geschenk abzutragen, nannte er obige Beziehung Ohmsches Gesetz. Durch eine einfache mathematische Umformung kann das Ohmsche Gesetz, ohne dass es seine Gültigkeit verliert, in 2 weiteren Formen zum Ausdruck gebracht werden. Es ist die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}}$$

und der

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}.$$

In sinngemässes Deutsch übersetzt, besagen diese drei Ausdrucksformen:

1. Ist in einem Stromkreis die Stromstärke und der Widerstand bekannt, dann ergibt sich die erforderliche Spannung durch Vervielfachung der Stromstärke mit dem Widerstand.
2. Ist in einem Stromkreis die Spannung und der Widerstand bekannt, dann ergibt sich die auftretende Stromstärke bei der Teilung der Spannung durch den Widerstand.
3. Ist in einem Stromkreis die Spannung und die Stromstärke bekannt, dann ergibt sich der vorhandene Widerstand bei der Teilung der Spannung durch die Stromstärke.

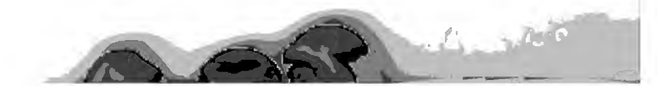
---

[1]) Ohm, 1787—1854, war Lehrer der Mathematik und Physik an verschiedenen Fachschulen Deutschlands.

Für den rechnenden Techniker hat das Ohmsche Gesetz ausserordentliche Bedeutung. Es gestattet ihm, mit Anwendung der einfachsten mathematischen Operationen, aus je zwei bekannten der obigen Grössen die dritte rechnerisch festzustellen.

Das Ohmsche Gesetz hat nicht nur für den gesammten Stromkreis Gültigkeit, sondern auch für die einzelnen Teile desselben. Allerdings ist dann an Stelle der Spannung und des Widerstandes des gesammten Stromkreises der Spannungsabfall und der Widerstand des betreffenden Stromkreisteiles zu setzen.

Das Ohmsche Gesetz hat nur Sinn, wenn man es vom rein quantitativen Standpunkte aus betrachtet; es werden lediglich Mengen verglichen und festgestellt. Irgendwas Anderes aus dem Ohmschen Gesetze lesen zu wollen — z. B. eine Erkenntniss der physikalischen Bedeutung der verglichenen Grössen — wäre ein vergebliches Bemühen. Um die nach dem Ohmschen Gesetze sich ergebenden Mengen vergleichen und feststellen zu können, sind vor allem für die Mengen selbst Maasstäbe zu schaffen, durch welche eine Vorstellung ihrer Grösse vermittelt wird. Von einer Länge erhält man z. B. eine Grössenvorstellung durch Vergleichen derselben mit einer willkürlich gewählten Einheit, z. B. dem Meter. Die Meteranzahl, welche in der Länge enthalten ist, bildet den Maassstab für die Länge. Dasselbe gilt auch für Gewichte, Zeiträume, Raumgrössen u. s. w.; dasselbe gilt aber auch für Spannung, Stromstärke und Widerstand. Für alle drei Grössen sind Einheiten erforderlich. Anundfürsich kann die die Einheit ausmachende Menge willkürlich angenommen werden, jedoch ist auf die in den elektrischen Einrichtungen gewöhnlich auftretenden Gesammt-Mengen Rücksicht zu nehmen. Diesen entsprechend, ist die Einheitsmenge so zu wählen, dass die Anzahl der Einheiten weder abnorm grosse, noch abnorm kleine Werte ergibt. Auch sonst sind noch viele andere Gesichtspunkte bei der Wahl dieser drei Einheiten zu berücksichtigen, so dass es einleuchtet, dass sich der internationale Elektrikerkongress zu Paris im Jahre 1881 mit der Festlegung allgemein gültiger Einheiten keine leichte Aufgabe gestellt hatte. Etwas erleichterte sich die Aufgabe dadurch, dass nur zwei Einheiten festzustellen waren; die dritte ergab sich durch die Beziehungen des Ohmschen Gesetzes von selbst. Zur quantitativen Beurteilung der drei elektrischen Haupt-



grössen bildet die Heranziehung recht augenfälliger, durch die Grössen veranlasster Wirkungen ein vorzügliches Mittel. Der Kongress hatte sich diese Thatsache sehr zu Nutzen gemacht. Da namentlich für die Stromstärke und die Spannung sehr charakteristische Wirkungen vorhanden waren, so wurde die Einheitenvermittelung auf diese beiden Grössen ausgedehnt. Die Wirkung des elektrischen Stromes auf einen Magneten war für die Stromstärke, die Wirkung eines Magneten auf einen bewegten Stromkreis war für die Spannung das Charakteristikum. Es hat für den Leser dieses Werkchens keinen grossen Sinn, sich an dieser Stelle mit der genauen Definition der Einheiten vertraut zu machen; besser ist für ihn, sich an der Hand der elektrischen Einrichtungen eine ungefähre Vorstellung von ihrer Grösse zu verschaffen. Ehe jedoch Beispiele gegeben werden können, sind die, ebenfalls von dem Kongress festgesetzten Einheitenbenennungen kennenzulernen. Hinsichtlich der Namengebung war sich der Kongress einig, mit dieser, illustren Stützen der Elektrotechnik ein ewiges Denkmal zu setzen; und so heisst denn die Einheit der Stromstärke Ampère,[1] die Einheit der Spannung Volt[2]) und die Einheit des Widerstandes Ohm.

Unter Zugrundlegung dieser Bezeichnungen ist zu bemerken, dass die gebräuchlichen Glühlampen, je nach ihrer Leuchtkraft, eine Stromstärke von ungefähr 0,1—1,5 Ampère; und die gebräuchlichen Bogenlampen eine solche von ungefähr 5—25 Ampère benötigen. Die übliche Spannung, die Stromkreise mit Glüh- und Bogenlampen als Nutzapparate aufweisen, ist 65 und 110 bis 120 Volt. Galvanische Elemente oder eine Akkumulatorenzelle besitzen Spannungen von ungefähr 0,5 bis 2,5 Volt. In den modernen Wechselstrommaschinen werden Ströme mit Spannungen oft bis zu 10000 Volt erzeugt. Bei Wolkenentladungen, in Gestalt des Blitzes, treten sogar Spannungen auf, die mehrere Millionen Volt betragen können. Der Widerstand von leuchtenden Glühlampen beträgt ca. 1000 bis 50 Ohm. Ein Kupferdraht von 1 qmm Querschnitt und ca. 60 m Länge besitzt einen Wider-

[1]) Ampère, 1775—1836, war Professor der Mathematik und Physik an der polytechnischen Schule in Paris.

[2]) Volta, 1745—1827, war Professor der Physik an der Universität in Pavia.



stand von 1 Ohm. Isolatoren setzen dem Stromdurchgang einen Widerstand von oft vielen Milliarden Ohm entgegen.

Um leichter mit dem Ohmschen Gesetze hantiren zu können, empfiehlt sich die Einführung abkürzender Bezeichnungen, am zweckmässigsten die Anfangsbuchstaben der Namen. So für Stromstärke S, für Spannung oder Spannungsabfall das E der elektromotorischen Kraft (um Verwechslungen mit dem S der Stromstärke vorzubeugen), für Widerstand W, für Ampère A, für Volt V und für Ohm den kunstvollen Schnörkel Ω des griechischen O (Omega). Letzteres Gebilde hatte sich in der Elektrotechnik einen Platz zu erobern gewusst, dank der Möglichkeit, die Konsequenz in der Bezeichnungsweise wahren zu können, ohne eine Verwechslung des O mit einer Null befürchten zu müssen.

Es wird sehr vorteilhaft sein, an der Hand einiger Beispiele, die vielseitige Brauchbarkeit und weittragende Bedeutung des Ohmschen Gesetzes zu zeigen. Von der abkürzenden Bezeichnungsweise wird gleichzeitig Gebrauch gemacht werden.

Erstes Beispiel. Aufgabe. In einer Verbindungsleitung fliesst ein Strom von 15 A; ihr Widerstand beträgt 5 Ω. Wie gross ist der auftretende Spannungsabfall in V?

Lösung. Gemäss der ersten Ausdrucksform des Ohmschen Gesetzes ist $E = S \times W$. Mit Hülfe dieser Gleichsetzung und den Zahlenwerten für S und W, ergibt sich für E einen Wert von $15 \times 5 = 75$ V.

Zweites Beispiel. Aufgabe. Eine Stromquelle liefert eine Spannung von 100 V. Der Widerstand des gesammten Stromkreises ist 2,5 Ω. Wieviel A besitzt der im Stromkreise fliessende Strom?

Lösung. Gemäss der zweiten Ausdrucksform des Ohmschen Gesetzes ist $S = \frac{E}{W}$. Mit Hülfe dieser Gleichsetzung und den Zahlenwerten für E und W ergibt sich für S einen Wert von $\frac{100}{2{,}5} = 40$ A.

Drittes Beispiel. Aufgabe. Eine Glühlampe besitzt einen Spannungsabfall von 110 V. Damit dieselbe die gewünschte Lichtstärke ergibt, ist 0,5 A Strom erforderlich. Wieviel Ω

muss der Glühfaden der Lampe haben, um die 0,5 A durchfliessen zu lassen?

Lösung. Gemäss der dritten Ausdrucksform des Ohmschen Gesetzes ist $W = \frac{E}{S}$. Mit Hülfe dieser Gleichsetzung und den Zahlenwerten für E und S, ergibt sich für W ein Wert von $\frac{110}{0,5} = 220\ \Omega$.

Die bisherigen Betrachtungen haben den Leser mit den Begriffen und Beziehungen der drei Hauptgrössen eines elektrischen Stromkreises bekannt gemacht. Die weiteren sich daran anknüpfenden Entwicklungen gipfeln in der Ermittlung der die Quantität dieser Grössen beeinflussenden Verhältnisse. Soweit dieselben für die Spannung in Frage kommen, sind sie derart innig mit dem Wesen der Stromquellen vereinigt, dass ihre Darlegung in einem Abschnitt über Stromquellen eine weit verständnissvollere Behandlung erfahren kann, als in dem vorliegenden. Die die Grösse der Stromstärke bestimmenden Verhältnisse sind in solchen Wechselbeziehungen zu denen von Spannung und Widerstand, dass mit der Kenntniss dieser, Verständniss für jene geschaffen ist. Es bleibt daher lediglich die Ermittlung der die Grösse des Stromkreiswiderstandes beeinflussenden Verhältnisse übrig.

Schon in dem ersten Abschnitte wurde darauf hingewiesen, dass der Widerstand eine Eigenschaft der den Stromkreis bildenden Stoffe ist, dass seine Grösse von der Natur und der räumlichen Ausgestaltung dieser Stoffe abhängig ist, und dass der Stromkreis in fast allen elektrischen Einrichtungen Drahtform besitzt. Daraus geht aber hervor, dass die die Widerstandsgrösse bestimmenden Verhältnisse wesentlich von der Natur und der Form der Leiter abhängig sein müssen. Eine Entscheidung hierüber zu fällen, ist Sache des Experimentes. Solche Experimente sind verhältnissmässig einfacher Natur und ergeben, selbst mit primitiven Hülfsmitteln durchgeführt, erkenntnissreiche Resultate. Sie zeigen, dass der Widerstand eine Vergrösserung erfährt, wenn sich der Leiter in die Länge, hingegen eine Verkleinerung, wenn sich der Leiter in die Quere ausdehnt; und dass körperlich gleichgeformte Leiter, je nach der Natur ihres Materiales, einen sehr

verschiedenen Widerstand haben können. Die Experimente zeigen weiterhin, dass sich der Widerstand in demselben Verhältniss vergrössert, in welchem sich die Länge vergrössert; hingegen in demselben Verhältniss verkleinert, in welchem sich der Querschnitt vergrössert. Ein 20 m langer Draht hat demnach den doppelten Widerstand eines Drahtes von 10 m Länge und demselben Querschnitt; ein Draht von 100 qmm Querschnitt hat nur die Hälfte des Widerstandes eines Drahtes von 50 qmm Querschnitt und derselben Länge. In einer derart allgemeinen Form sind jedoch diese Resultate dem berechnenden Techniker von keinem besonderen Nutzen. Es bleibt immer noch die Aufgabe übrig, den Widerstand in eine dem Ohmschen Gesetze analoge Gleichsetzung zu den ihn beeinflussenden Grössen zu bringen. Erst damit ist der Techniker instandgesetzt, auf rechnerischem Wege die Anzahl der Widerstandseinheiten zu ermitteln, welche z. B. ein Kupferdraht von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitte besitzt. Da die Länge des Leiters einen Widerstand vergrössert, der Querschnitt hingegen verkleinert, so hat die Länge, mathematisch ausgedrückt, einen vervielfachenden, der Querschnitt einen teilenden Einfluss auf den gesammten Widerstand. Die Gleichsetzung enthält demnach einen Bruch, in welchem die Länge als Zähler, der Querschnitt als Nenner figurirt. Ausser diesem Bruch wird aber noch ein die Natur des Leitermateriales berücksichtigender Wert in der Gleichsetzung auftreten müssen und zwar ein Wert, welcher von der Länge und dem Querschnitte des Leiters unabhängig ist. Das kann aber nur der Widerstand sein, welcher einem Leiter von der Länge Eins und dem Querschnitte Eins angehört. Mit diesem Widerstand ist der Bruch zu vervielfachen, um den gesammten Widerstand zu erhalten. Alle, die Grösse des gesammten Widerstandes beeinflussenden Eigenschaften des Leitermateriales — mit Ausnahme der räumlichen — finden in diesem Widerstande ihren zahlenmässigen Ausdruck. Mit Recht nennt ihn daher der Elektrotechniker spezifischen Widerstand. Der spezifische Widerstand spielt für die Ermittlung von Leiterwiderständen dieselbe Rolle, wie das spezifische Gewicht für die Ermittlung von Körpergewichten. Die Wahl einer passenden Längen- und Querschnittseinheit ist von der räumlichen Grösse abhängig, in welcher die

Stromkreisteile durchgängig aufzutreten pflegen. Als sehr geeignete Einheiten sind das **Meter** (m) und das **Quadratmillimeter** (qmm) allgemein anerkannt worden. Der spezifische Widerstand ist demnach als der Widerstand eines Leiters von der Länge 1 m und dem Querschnitt 1 qmm festzustellen; und die dem gesammten Widerstande entsprechende Gleichsetzung muss lauten:

$$\text{Gesammter Widerstand} = \text{Spezifischer Widerstand} \times \frac{\text{Leiterlänge in m}}{\text{Leiterquerschnitt in qmm.}}$$

Wie bei dem Ohmschen Gesetze wird auch hier durch die Einführung von s, L und Q an Stelle des spezifischen Widerstandes, der Länge und des Querschnittes eine für die rechnerische Handhabung obiger Gleichsetzung wünschenswerte Abkürzung geschaffen. Es ergibt sich durch sie die einfache Form

$$W = s \times \frac{L}{Q}$$

Da die Fähigkeit der Körper, Strom zu führen, ausserordentlich verschieden ausgebildet ist, so wird ihr spezifischer Widerstand ebenfalls sehr verschieden gross sein. Wie abnorm die Abweichungen in dem spezifischen Widerstande sein können, zeigen beistehende zwei Tabellen.

Leiterart	№	Namen des Körpers	Spezifischer Widerstand bei 15° C in Ω	Leitungsfähigkeit bei 15° C
Gute Leiter	1	Kupfer	0,017—0,0175	59—57
	2	Eisen	0,1—0,12	10—8,3
Mittelgute Leiter	3	Neusilber	0,34—0,39	3—2,6
	4	Manganin	0,42	2,4
	5	Konstantan	0,50	2
	6	Kruppin	0,85	1,2
	7	Quecksilber	0,95	1,05
	8	Graphit	12	0,08
	9	Kohlenstäbe für Bogenlampen	80—130	0,012—0,008
	10	Glühlampenfäden	ca. 2000	0,0005
Schlechte Leiter	11	30 % Schwefelsäure	ca. 14000	0,00007
	12	24 % Zinkvitriollösung	ca. 20000	0,00005



Leiterart	№	Namen des Körpers	Spezifischer Widerstand bei 1 cm Isolatorlänge, in Megohm
Isolatoren	13	Vulkanfiber	ca. 12 Millionen
	14	Glimmer	» 84 »
	15	Kautschuklack	» 9000 »
	16	Paraffin	» 34000 »
	17	Porzellan	» 500000 »
	18	Trockene Luft	unmessbar gross
	19	Chemischreines Wasser	unmessbar gross

Zu diesen zwei Tabellen ist folgendes zu bemerken. Sie enthalten durchschnittliche und abgerundete Werte. No. 3, 4, 5 und 6 sind Leitermaterialien, wie sie seit einigen Jahren zur Herstellung von künstlichen Widerständen bei Messinstrumenten und dergleichen, in die Technik eingeführt wurden. Die Thatsache, dass auch die Wärme auf die Grösse des spezifischen Widerstandes von Einfluss ist — wenn auch, vom Standpunkt der Praxis aus, meistens nur in verhältnissmässig unerheblichem Maasse — verlangt bei der Vergleichung die Einhaltung einer gleichbleibenden Temperatur. 15° C. ist allgemein üblich. Um spezifische Widerstände von Isolatoren festzustellen, ist die Einheit Ohm viel zu klein und die Längeneinheit 1 m zu gross; zweckmässiger ist die Benutzung einer, eine Million mal grösseren Einheit, welche den Namen Megohm führt und der Längeneinheit 1 cm. Beide Einheiten sind der zweiten Tabelle zugrundegelegt. Bilden die spezifischen Widerstände, wie z. B. beim Kupfer, sehr kleine Werte, so ist im Interesse des leichteren Einprägens und Rechnens die Benützung des umgekehrten Wertes des spezifischen Widerstandes, der sogenannten Leitungsfähigkeit $\frac{1}{s}$, zu empfehlen. Um diese Willkürlichkeit bei Widerstandsberechnungen unschädlich zu machen, ist der Bruch $\frac{L}{Q}$



nicht mit $\frac{1}{s}$ zu vervielfachen, sondern durch $\frac{1}{s}$ zu teilen. Mit dem Grösserwerden der spezifischen Widerstände verliert — wie auch die Tabelle zeigt — der Vorteil der Anwendung der Leitungsfähigkeit sehr an Bedeutung. Bei Materialien von so kleinem spezifischen Widerstande wie das Kupfer, spielt die chemische Reinheit eine erhebliche Rolle. Schon sehr geringe Beimischungen fremder Stoffe sind im Stande das Material in seiner Eigenschaft als Stromleiter zu verschlechtern. Bei den grossen Kapitalien, welche ununterbrochen in den kupfernen Leitungsnetzen der modernen Zentralen investirt werden, ist die weitgehendste Ausnutzung der Leitungsfähigkeit des Materiales ein unbedingtes Erforderniss. Vor ungefähr 3 Jahren hatte der Verband deutscher Elektrotechniker Normen für Kupfer geschaffen, deren Innehaltung von dem Lieferanten zu garantiren sein würde. Von besonderem Interesse ist der § 3 — Kupfer, dessen spezifischer Widerstand grösser als 0,0175 oder dessen Leitungsfähigkeit kleiner als 57 ist, ist als Leitungskupfer nicht annehmbar — und der § 4 — als Normalkupfer von 100 % Leitungsfähigkeit gilt ein Kupfer, dessen Leitungsfähigkeit 60 beträgt. Eine andere, ebenfalls recht zweckmässige Garantieform wäre folgende: Ein Kupferleiter von 1 Ohm Widerstand und 1 qmm Querschnitt muss bei 15 ° C von einer Länge sein, die 57 Meter nicht unterschreitet. Es können 58—59 Meter gefordert werden.

Im Anschluss an diese Betrachtungen sind einige weitere Erörterungen über das Kupfer der Elektrotechnik gut angebracht. Von den vielen möglichen Querschnittsgrössen haben sich glücklicherweise nur verhältnissmässig wenige in der elektrotechnischen Industrie eingebürgert. Auf sie rundet der Techniker seine Rechnungswerte ab und gewöhnt sich ganz daran, sein Vorstellungsvermögen auf Querschnitts- und nicht, wie sonst gebräuchlich, auf Durchmesserwerte auszudehnen. Nachstehende Tabelle enthält die gebräuchlichen Kupferquerschnitte, nebst den entsprechenden, abgerundeten Durchmessern.



Draht-querschnitt in qmm	Durchmesser in mm	Draht-querschnitt in qmm	Durchmesser in mm
0,75	0,98	25	5,65
1	1,13	35	6,68
1,5	1,38	50	8
2,5	1,79	70	9,45
4	2,26	95	11
6	2,77	120	12,4
10	3,57	150	13,8
16	4,52		

Während bei den meisten Einzelanlagen die Preise für das Leitungsmaterial fest vereinbart werden, ist dies bei Zentralen, im Interesse des Lieferanten und des Bestellers, nicht mehr angängig. Hier müssen die Preisschwankungen des Kupfermarktes eine Berücksichtigung erfahren. Den Hauptkupfermarkt in Europa bildet London; dorthin wirft Nordamerika schon seit 1890 weitaus das meiste, für die Zwecke der Elektrotechnik in Umsatz gebrachte Kupfer und zwar in Form von Barren (Chilibars). Die Notirungen werden in Pfunden Sterling (Lstr.) festgelegt und gelten pro Tonne (1000 kgr) Chilibars. Sie unterliegen steten Schwankungen. So war z. B. die Chilibarsnotirung im Jahre 1896 folgende: Stand im Anfang des Jahres 41 Lstr., nachher stetes Wachsen bis auf 50 Lstr., von Juli ab, den ganzen Herbst hindurch, ein langsames Fallen bis auf 46 Lstr., dann aber wieder, in den Winter hinein, ein Steigen bis auf 50 Lstr. Ende 1898 stand das Kupfer auf 56 bis 57 Lstr. und Mitte Februar 1899 sogar auf 72 Lstr. Diesen jeweiligen Kupfernotirungen entsprechend, werden die Einheitspreise der Leitungen festgelegt und in die Kostenanschläge eingesetzt. Beigefügt wird jedoch die leichtverständliche, an einem besonderen Beispiel dargestellte Chilibars-Klausel: Die Preise für Kupferdrähte basiren auf einer Chilibars-Notirung von 42 Lstr. per Tonne und erhöhen bezw. erniedrigen sich um 2 Mark per 100 kgr, bezw. um 18 Pfennig per Kilometer und Quadratmillimeter, für jedes Lstr., um welches die Notirung zur Zeit des Vertragsabschlusses höher bezw. niedriger steht.



Die Bestimmung von Widerständen aus den Dimensionen und der Natur der Leiter, oder auch das Umgekehrte, findet am häufigsten Anwendung bei der Vorausberechnung von elektrischen Maschinen, Leitungsnetzen etc. Bei fertigen Einrichtungen ist eine derartige, nachträgliche Ermittelung von Widerständen oft nur schwer, ja meistens gar nicht, zu ermöglichen. Hier kann nur eine Vergleichung mit bekannten (geaichten) Widerständen zum Ziele führen. Thatsächlich gründet der grösste Teil der Widerstandsbestimmungsmethoden der elektrischen Messtechnik auf Vergleichungsmessungen.

Hat das Ohmsche Gesetz schon in der kennengelernten einfachen Form grosse Verwendungsfähigkeit, so wird dieselbe noch erheblich durch die Einführung der den Widerstand bestimmenden Grössen, an Stelle seiner selbst, gesteigert. So lässt sich z. B. von der Gleichsetzung $E = S \times W$, in der erweiterten Ausdrucksform $E = S \times (s\frac{L}{Q})$ oder $S \times (\frac{L}{\frac{1}{s} Q})$, die weittragendste Bedeutung für Leitungsnetzberechnungen konstatiren. Wie bekannt, hat das Leitungsnetz den Zweck Elektrizität aus Stromquellen nach Nutzapparaten zu führen. Wieviel Elektrizität nach den Nutzapparaten geleitet werden soll und welchen Weg dieselbe einzuschlagen hat, hängt von der Nachfrage und den örtlichen Verhältnissen ab. Die Stromstärke S und die Leitungslänge L sind demnach im voraus bestimmte Grössen und entziehen sich der Willkür des Leitungsnetze berechnenden Mannes vom Fach. Der durch die Stromstärke in dem Leitungsnetzwiderstande hervorgerufene Spannungsabfall darf, wie später eingehend klargelegt wird, im Interesse der Oekonomie und eines tadellosen Funktionirens der Nutzapparate, eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Der Schwerpunkt der Leitungsnetzberechnung liegt in der Ermöglichung der Einhaltung dieser Forderung. Der brauchbaren Mittel dazu gibt es lediglich ein einziges und das besteht in der Feststellung richtig dimensionirter Leiterquerschnitte. Hiebei kommt aber die erweiterte Ausdrucksform des Ohmschen Gesetzes zu ihrer vollen Geltung, da sie ausschliesslich Beziehungen zwischen den angeführten Grössen enthält und mit Leichtigkeit eine Umformung gestattet, welche die Gleichsetzung des Quer-

schnittes zu diesen Grössen und damit die Möglichkeit der rechnerischen Querschnittsfeststellung ergibt. Die Umformung, nach den einfachen Regeln der Gleichungslehre durchgeführt, ergibt für den Querschnitt die wichtige Gleichsetzung:

$$Q = S \times (s\frac{L}{E}) = S \times (\frac{L}{\frac{1}{s} E}).$$

Auch hier dürfte sich durch einige Beispiele eine bessere Einprägung von der Bedeutung der Gleichsetzung des Widerstandes und der beiden erweiterten Ausdrucksformen des Ohmschen Gesetzes für den Leser erzielen lassen.

Erstes Beispiel. Aufgabe. Es ist aus Konstantandraht von 0,75 qmm Querschnitt ein Widerstand von 15000 Ω für ein Messinstrument herzustellen. Wie gross muss die Länge des Drahtes sein?

Lösung. Gemäss der Widerstandsgleichsetzung ist $W = s \times \frac{L}{Q}$. Durch entsprechende Umformung erhält diese Gleichsetzung die Form: $L = W \times \frac{Q}{s}$. Aus der Tabelle über die spezifischen Widerstände ergibt sich für Konstantan $s = 0{,}5$. Dieser und die übrigen bekannten Werte in die Gleichsetzung eingeführt, ergeben für die Länge den Wert von $15000 \times \frac{0{,}75}{0{,}5} = 22500$ m.

Zweites Beispiel. Aufgabe. Eine Bogenlampe bedarf zum normalen Betriebe 15 A. Die den Strom führende Leitung besteht aus Eisendraht und hat hin und zurück eine Länge von 135 m. Der Querschnitt ist derart dimensionirt, dass auf 1 qmm 1,5 A entfällt. Wie gross ist der Spannungsabfall in der Leitung und wie gross muss die Spannung an der Austrittsstelle der Stromquelle sein, wenn der Spannungsabfall in der Bogenlampe 45 V beträgt?

Lösung. Gemäss der ersten, erweiterten Ausdrucksform des Ohmschen Gesetzes ist $E = S \times (\frac{L}{\frac{1}{s} \times Q})$. S und L sind direkt gegebene Werte; $\frac{1}{s}$ ist aus der Tabelle, mit dem Werte 10, zu entnehmen; Q ist bei 15 A gesammter Stromstärke und 1,5 A



pro 1 qmm gleich $\frac{15}{1,5} = 10$ qmm. Diese Werte in die Gleichsetzung eingeführt, ergeben für den Spannungsabfall der Eisenleitung: $E = 15 \times \frac{135}{10 \times 10} =$ rund 20 Volt. Der Spannungsabfall der Eisenleitungen und der der Bogenlampe ergeben zusammen einen Wert, welchem die Spannung der Maschine an der Austrittsstelle zu entsprechen hat. Diese ist demnach $20 + 45 = 65$ Volt.

Drittes Beispiel. Aufgabe. In einer zu einer Glühlampe von 0,7 A Stromverbrauch führenden Leitung von 260 m Gesammtlänge soll der Spannungsabfall nicht mehr als 2,5 V betragen. Wie stark muss die Kupferleitung in ihrem Querschnitte sein?

Lösung. Gemäss der zweiten, erweiterten Ausdrucksform des Ohmschen Gesetzes ist $Q = S \times \left(\frac{L}{\frac{1}{s} \times E}\right)$. Aus der Tabelle über spezifische Widerstände lässt sich der Wert von $\left(\frac{1}{s}\right)$ für Kupfer entnehmen; dieser, mit den übrigen, durch die Aufgabe gegebenen Zahlenwerten in die Gleichung eingesetzt, ergibt für den Querschnitt den Wert von $0,7 \times \frac{260}{59 \times 2,5} = 1,24$ qmm. Dieser Querschnitt ist auf den zunächstliegenden gangbaren Querschnitt nach oben abzurunden; die Querschnittstabelle ergibt hiefür 1,5 qmm.

In dem Abschnitte I wurden die Stromquelle, der Nutzapparat und die Verbindungsleitung als die einen jeden elektrischen Stromkreis ausmachenden Bestandteile hingestellt. In Bezug auf die Art und die Anzahl dieser Bestandteile ist in den verschiedenen Einzel- und Zentralanlagen eine ausserordentlich grosse Mannigfaltigkeit vorhanden. Der Charakter einer Privatanlage mit bescheidener Stromerzeugungsmaschine, wenigen Glühlampen und, wenn es hoch kommt, noch einer oder gar zwei Bogenlampen, steht in grellem Gegensatze zu einem modernen Elektrizitätswerke mit seinen mächtigen Stromquellen und den daraus entnommenen, gewaltigen Strommengen, welche in kilometerlangen Leitungsnetzen tausende von Nutzapparaten der ver-



schiedensten Systeme bethätigen. Und doch — trotz dieser weitgehenden Verschiedenheit ihres Gesammtbildes, tragen beide Arten von Anlagen viel Gemeinsames in sich, dessen Herausschälung und Darlegung für den Leser das Fundament einer einsichtsvollen Erkenntniss bilden wird. Dem Entwicklungsgange des Werkchens entsprechend, soll vor allem an der Verbindungsleitung die Richtigkeit dieser Ansicht dargelegt werden.

Ist eine Stromquelle mit verschiedenen Nutzapparaten zu verbinden, so geschieht dies am einfachsten durch Aneinanderreihen der Stromquelle und der Nutzapparate mit Hülfe von Leitungsdrähten und zwar derart, dass stets die Stromeinführungsstelle des in der Reihe folgenden Apparates mit der Stromausführungsstelle des voraufgehenden zusammenhängt und dann das Ganze zu einem geschlossenen Kreise vereinigt wird. Eine derartige Verbindung, welche der Elektrotechniker sehr treffend Hintereinanderschaltung nennt, ist in der nebenstehenden Fig. 8 an einer elektrischen Maschine und 4 Bogenlampen dargestellt. Der Strom, welcher von der Stromquelle in Bewegung gesetzt wird, durchfliesst in gleicher Stärke sämmtliche 4 Bogenlampen. Das bedingt ganz allgemein, dass alle Nutzapparate, welche gleichzeitig in Hintereinanderschaltung bethätigt werden wollen, für dieselbe Stromstärke eingerichtet sein müssen. Das ist aber bei dem sehr verschiedenen Charakter der Nutzapparate leichter gesagt, als gemacht. Versagt einer der eingeschalteten Apparate, indem er dabei den Stromkreis öffnet, so zieht dieser Vorfall das Versagen sämmtlicher andern, in denselben Kreis eingeschalteten Apparate nach sich. Die Betriebssicherheit der gesammten Anlage ist demnach von der Vermeidung eines nicht gewünschten Öffnens des Stromkreises abhängig. Die Möglichkeit dieser Vermeidung ist sehr schwer zu erlangen; die Anlage wird meistens dadurch praktisch unbrauchbar. Werden Nutzapparate ein- bezw. ausgegeschaltet, so vergrössert bezw. verringert sich der Widerstand

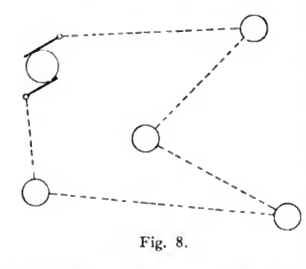


Fig. 8.

des gesammten Stromkreises und die Spannung der Stromquelle wird eine kleinere bezw. grössere Stromstärke erzeugen, als zum normalen Betriebe der Nutzapparate erforderlich ist. Das ist aber ein grosser Uebelstand, gegen welchen nur Abhilfe geschaffen werden kann, indem die Spannung der Stromquelle veränderbar gemacht wird und zwar derart, dass sie sich um so viel vergrössert bezw. verkleinert, als zur Gleichhaltung der Stromstärke verlangt wird. Dieses Reguliren der Stromquelle auf konstante Stromstärke im Stromkreise ist keine leichte Sache, sie bereitet viele technische Schwierigkeiten. Durch das Ein- und Ausschalten von Nutzapparaten werden jedesmal Unterbrechungen — wenn auch nur momentane — geschaffen, welche ebenfalls die Betriebssicherheit stören. Werden viele Nutzapparate hintereinander geschaltet, dann summiren sich die Spannungsabfälle derselben zu einem so hohen Betrage, dass es technisch sehr oft unmöglich ist, eine Stromquelle von der diesem Betrage entsprechenden Spannung herzustellen. Es könnten zwar mehrere Stromquellen hintereinander geschaltet werden, deren Spannungen sich in der Wirkung addiren würden, allein ein solches Hülfsmittel besitzt keinen grossen praktischen Wert. Die Hintereinanderschaltung lässt es vorteilhaft erscheinen, Nutzapparate mit möglichst kleinem Spannungsabfall zu bauen. Da sie aber dadurch teuer und unökonomisch werden, so ist der Vorteil sehr problematischer Natur. Aus Alledem geht hervor, dass die Verbindung der Stromkreisteile in Hintereinanderschaltung für den Bau von Leitungsnetzen nur von geringem Werte sein kann. Thatsächlich beschränkt sich diese Schaltungsweise in der Praxis beinahe auf den einzigen Fall, dass gleichgrosse und gleichzeitig brennende Bogenlampen miteinander verbunden werden sollen.

Die Vereinigung von Stromquellen mit Nutzapparaten lässt sich noch auf eine zweite Art bewerkstelligen. Sämmtliche Stromeinführungsstellen der Nutzapparate werden durch entsprechende Leitungen mit den vereinigten Stromausführungsstellen der Stromquellen verbunden und ebenso sämmtliche Stromausführungsstellen der Nutzapparate mit den vereinigten Stromeinführungsstellen der Stromquellen. Eine derartige Verbindung, welche in der Elektrotechnik unter dem ebenfalls gut gewählten

Namen **Parallelschaltung** bekannt ist, zeigen die Figuren 9 und 10. Beide Figuren kommen in Bezug auf den verfolgten Zweck auf dasselbe hinaus; Fig. 9 lehnt sich jedoch mehr an die gegebene Definition, Fig. 10 mehr an die Wirklichkeit an.

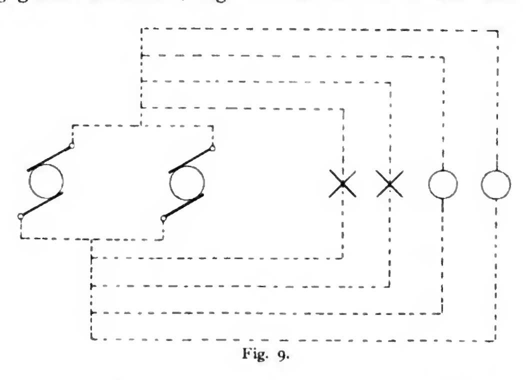


Fig. 9.

Da sämmtliche Nutzapparate direkt an die Stromquelle geschaltet sind, so folgt daraus, dass jeder seinen besonderen, nur ihn und die Stromquelle durchfliessenden Stromanteil erhält, und dass die zur Bewegung dieser Ströme erforderlichen Spannungsbeträge gleich gross und zwar gleich der Spannung der Stromquelle sind. Nutzapparate in Parallelschaltung sind demnach für gleichen Spannungsabfall zu bauen. Diese Forderung ist leichter zu erfüllen und weitgehender zu verwerten, als die der gleichen Stromstärke,

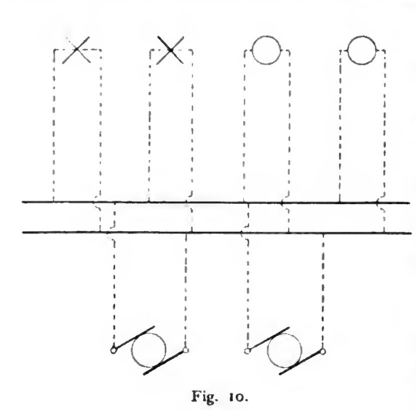


Fig. 10.

wie bei der Hintereinanderschaltung. Versagt bei dem Parallelbetrieb einer der eingeschalteten Apparate, indem er dabei seinen Kreis öffnet, so hat dies kein Versagen der übrigen Nutzapparate, wie bei der Hintereinanderschaltung, zur Folge. Die Betriebssicherheit einer Leitungsanlage in Parallelschaltung ist demnach wesentlich grösser, als die einer solchen in Hintereinanderschaltung. Die einzelnen Nutzapparate können sehr verschieden grosse Widerstände haben, je nach der Stromstärke, welche in ihnen fliessen soll; ebenso können auch die diesen Widerständen entsprechenden Stromleiter körperlich und stofflich sehr grosse Unterschiede aufweisen. Um die charakteristischen Eigenthümlichkeiten der Parallelschaltung anschaulich darzulegen, empfiehlt es sich, die den verschiedenen Nutzapparaten angehörenden Stromleiter gleichlang und von gleichem Material hergestellt anzunehmen und die Widerstandsverschiedenheit lediglich durch passende Querschnittswahl erzielt zu denken. Eine Parallelschaltung derartig ausgebildeter Nutzapparate lässt sofort erkennen, dass ihr gesammter Widerstand dem Widerstande eines Leiters entspricht, welcher durch das Zusammenlegen der Einzelleiter erhalten wird. Da durch das Zusammenlegen lediglich der Querschnitt eine Aenderung und zwar eine Vergrösserung erfährt, so muss der Gesammtwiderstand der Nutzapparate immer kleiner werden, als jeder einzelne derselben. Durch das Parallelschalten wird also der gesammte Stromkreiswiderstand verringert und zwar in um so höherem Maasse, je mehr Nutzapparate parallel geschaltet werden. Bei der Hintereinanderschaltung ist es gerade umgekehrt. Dort vergrössert sich der Widerstand des gesammten Stromkreises durch das Einschalten von Nutzapparaten. In demselben Verhältnisse, in welchem sich der gesammte Widerstand verkleinert, vergrössert sich aber, gemäss dem Ohmschen Gesetze, die gesammte Stromstärke. Die Stromquelle wird demnach beim Zuschalten von Nutzapparaten ganz von selbst immer mehr und mehr Strom liefern, während sie beim Abschalten immer mehr und mehr an Strom verliert. Diese Art Selbstregulirung der Parallelschaltung macht sie ausserordentlich wertvoll für Leitungsnetze; in ihr liegt wohl der Kernpunkt der Überlegenheit dieser Schaltung gegenüber der Hintereinanderschaltung. Die Hintereinanderschaltung kann nur durch künstliche Änderung der

Stromquellenspannung das Zu- und Abschalten der Nutzapparate ohne gegenseitige Beeinflussung erzielen. Die Anzahl der in einem Leitungsnetze möglichen Nutzapparate erfährt bei der Parallelschaltung keine Einschränkung, denn die durch den sich steigernden Konsum gebotene Forderung der stufenweisen Vermehrung der Strommengen, lässt sich durch nachträgliches Parallelschalten neuer Stromquellen leicht verwirklichen. Bei der Hintereinanderschaltung lautet die Forderung auf Spannungserhöhung. Mit dieser geht Hand in Hand eine Erhöhung der persönlichen Gefahr und die Schwierigkeit der Herstellung einer guten Leitungsisolation. Beides steckt einer Nutzapparatenvermehrung verhältnissmässig enge Grenzen. Einen sehr erheblichen Nachteil scheint aber die Parallelschaltung gegenüber der Hintereinanderschaltung doch zu besitzen. Während bei letzterer nur eine Hin- und Rückleitung erforderlich ist, welche im Querschnitt nach dem Strombedarfe eines Nutzapparates angelegt wird, sind bei der Parallelschaltung ebensoviele Hin- und Rückleitungen erforderlich, wie Nutzapparate vorhanden sind. Diese sämmtlichen Leitungen haben einen dem Strombedarf sämmtlicher Nutzapparate entsprechenden Gesammtquerschnitt aufzuweisen. In Etwas lässt sich diese unangenehme Thatsache verbessern. Sind mehrere Nutzapparate nahe beieinander, dann können diese durch eine einzige Hin- und Rückleitung mit Strom versorgt werden, welche, nach einem geeignet gewählten Zentrum geführt, nur noch kurzer, von da aus parallel geschalteter Zusatzleitungen zur Verbindung bedarf. (Siehe Fig. 11.) Viel wird dadurch allerdings auch nicht gebessert; der Vorteil liegt mehr in der vereinfachten Leitungsanordnung, als in einer Ersparniss an Kupfer. Der Nachteil des erheblichen Kupfermehrverbrauches musste von der Elektrotechnik als ein notwendiges Übel mit in Kauf genommen werden, wollte sie das Problem der weitgehendsten Teilung der Elektrizität als gelöst ansehen. Der Sprung von der idealen Form der Parallelschaltung, wie sie z. B. die Fig. 9 zeigt, bis zu der komplizirten der heutigen Zentralennetze war kein kleiner; er erforderte Zeit, viel Kopfzerbrechen und ein schönes Lehrgeld. Wenn es erlaubt ist, Gleichnisse aus fernliegenden Wissensgebieten heranzuziehen, um eine Sache recht klar zu machen, dann bietet das Blutgefässsystem des menschlichen

Körpers in seiner Verästelung ein vortreffliches Mittel, um das Wesen solcher Zentralennetze vom richtigen Gesichtspunkte aus zu erfassen. Die Ausspinnung und Übertragung dieses Gleichnisses sei dem Leser vorbehalten.

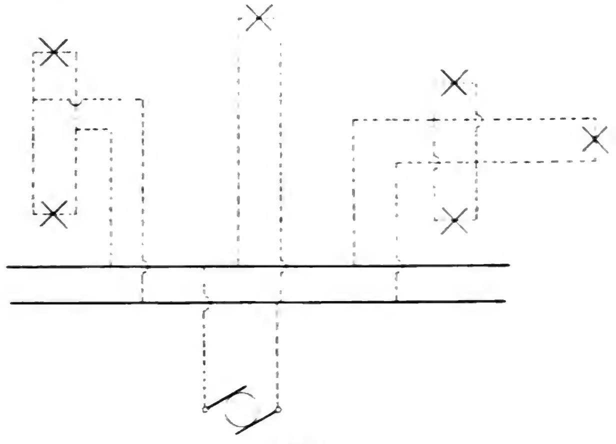


Fig. 11.

In dem ersten Abschnitt wurde, um es nochmals zu wiederholen, dargestellt, dass die Stromkreisleiter durch ihren Widerstand hemmend auf die Bewegung der Elektrizität einwirken und dass, um trotzdem einen dauernden, konstanten Strom in dem Stromkreise zu erzielen, eine die Bewegung erhaltende Kraft — die Spannung — in der Stromquelle wirken muss, welche in ihrer Grösse der hemmenden Gegenwirkung mindestens gleich zu sein hat. Der Vorstellung des Fliessens der Elektrizität in den Leitern entsprechend, kann die Gegenwirkung als Reibung aufgefasst werden. Wird die allgemein bekannte Thatsache in Erwägung gezogen, dass, wenn ein in Bewegung befindlicher Körper sich an einem andern reibt, an der Reibungsstelle Wärme auftritt, so ist die Annahme gewiss berechtigt, dass durch die Reibung der fliessenden Elektrizität in den Leitern ebenfalls

Wärme erzeugt wird. Dass dem wirklich so ist, davon liefern die Glüh- und Bogenlampen einen schlagenden Beweis. Ein jeder Leiter, durch welchen Strom fliesst, wird erwärmt. Diese fundamentale Thatsache ist für die Elektrotechnik von den weittragendsten Konsequenzen geworden; fast in allen von ihr geschaffenen Einrichtungen hat sie mit der Wärmeerzeugung zu rechnen. Manchmal ist die Wärmeerzeugung das Mittel zum Zweck, wie z. B. in den genannten Apparaten, manchmal ist sie ein Schmerzenskind; in dem ersten Fall wird sie nach Kräften gefördert, in dem letzten nach Möglichkeit verhindert. Ohne Frage war die experimentelle Erforschung dieser elektrischen Wärmeerzeugung, namentlich hinsichtlich der ihre Grösse bestimmenden Einflüsse, eine Angelegenheit von der grössten Wichtigkeit. Dem englischen Physiker Joule [1]) gelang 1841 der Nachweis, dass die in einem Leiter durch den Strom entwickelte Wärmemenge lediglich von der Grösse des Widerstandes, der Stromstärke und der Zeit des Fliessens abhängig ist. Ja er war sogar im Stande, für eine beliebig gewählte Widerstands- und Stromstärkeeinheit die pro 1 Sekunde entwickelte Wärmemenge in Kalorien [2]) zu ermitteln. Die zwischen dieser Wärmemenge und den obigen Grössen bestehende, gesetzmässige Beziehung war ein weiteres, wichtiges Resultat seiner Experimente; sie liess sich in ein einfaches mathematisches Gewand kleiden und gestattete Joule die in einem beliebigen Widerstande, von einer beliebigen Stromstärke, in einer beliebigen Zeit entwickelte gesammte Wärmemenge rein rechnerisch festzustellen. Unter Umrechnung der von Joule ermittelten Werte auf die erst später eingeführten Einheiten Ampère und Ohm, ergibt sich für die von 1 A, in 1 Ω und in einer Sekunde entwickelte Wärmemenge

---

[1]) J. P. Joule, 1818—1889, in seinen jüngeren Jahren Bierbrauer, machte 1843—1878 das Gebiet der Elektrizität und der Wärme zum Gegenstande einer grossen Reihe erfolgreicher Experimente.

[2]) Kalorie ist die Einheit der Wärmemenge. In der Naturwissenschaft und Technik wird sowohl die Grammkalorie, als auch die tausendmal grössere Kilogrammkalorie als Einheit benutzt. Unter beiden Einheiten wird diejenige Wärmemenge verstanden, welche erforderlich ist, um 1 Gramm bezw. 1 Kilogramm Wasser von 0° auf 1° Celsius zu erwärmen. Die gebräuchliche, abgekürzte Bezeichnung für diese Einheiten ist gr-Cal. und kgr-Cal.



0,24 gr-Cal. bezw. 0,00024 kgr-Cal. Diese Zahlen zu Grunde gelegt, formulirt sich das Joulesche Gesetz dahin:

$$\text{Gesammte entwickelte Wärmemenge} = \begin{cases} 0{,}24 \times \text{Stromstärke im Quadrat} \times \text{Widerstand} \times \text{Zeit} \ldots \text{gr-Cal.} \\ 0{,}00024 \times \text{Stromstärke im Quadrat} \times \text{Widerstand} \times \text{Zeit} \ldots \text{kgr-Cal.} \end{cases}$$

Wird in dieser Gleichsetzung die gesammte Wärmemenge mit dem Buchstaben M und die Anzahl der Sekunden mit T abgekürzt bezeichnet, so ist eine sehr kurze Form des Jouleschen Gesetzes die:

$$M = \begin{cases} 0{,}24 \times S^2 \times W \times T \ \text{gr-Cal.} \\ 0{,}00024 \times S^2 \times W \times T \ \text{kgr-Cal.} \end{cases}$$

Sehr auffallend an diesem Gesetze ist das quadratische Verhältniss von S zu M. Eine Verdoppelung der Stromstärke hat demnach nicht eine Verdoppelung, sondern eine Vervierfachung der gesammten entwickelten Wärmemenge zur Folge. Diese Auffälligkeit erhält jedoch durch die Zurechtlegung der eigentlichen Bedeutung des Jouleschen Gesetzes eine einfache Erklärung. Wird $S^2 \times W$ in $S \times W$ und S zerlegt, so ist $S \times W$ offenbar der Ausdruck für die die Strombewegung zu hemmen versuchende Gegenkraft, für die Reibung. Die Stromstärke wirkt daher einmal als Bestandteil der Reibung, das andermal als die die Reibung überwindende Elektrizitätsmenge vervielfachend auf die gesammte zur Entstehung gelangende Wärmemenge ein; demnach zusammengenommen, quadratisch vervielfachend. Indem sich die Reibung der Bewegung der Elektrizität während der Zeit T entgegensetzt, bringt sie eine Wirkung hervor, welche elektrische Widerstandsarbeit genannt wird und welche in $(S \times W) \times S \times T$ ihren rechnungsmässigen Ausdruck findet. Verrichtet aber die Reibung eine Arbeit, dann verrichtet auch die der Reibung das Gleichgewicht haltende und die Bewegung der Elektrizität veranlassende Spannung eine Arbeit, welche der der Reibung gleich sein muss. Diese Arbeit wird elektrische Bewegungsarbeit genannt. Da nach dem Ohmschen Gesetze E dem Produkte $S \times W$ völlig gleichwertig ist, so ist $E \times S \times T$ offenbar der rechnungsmässige Ausdruck für die Bewegungsarbeit. So oft in der Elektrotechnik ganz allgemein von elektrischer Arbeit die Rede ist, wird stets die Bewegungsarbeit darunter verstanden.

Diesem Gebrauche wird auch hier Folge gegeben werden. Der Begriff der Arbeit ist für die Elektrotechnik von grösster Wichtigkeit; weder die Stromstärke, noch die Spannung, für sich genommen, vermögen einen Überblick über die elektrischen Einrichtungen innewohnenden Wirkungsfähigkeit zu geben; das kann nur die elektrische Arbeit. Nie ist ausser Acht zu lassen, dass der Begriff der elektrischen Arbeit eine, eine bestimmte Zeit wirkende Kraft (Spannung) und eine sich bewegende Masse (Stromstärke) enthält. In der Mechanik spielt bekanntlich der Begriff Arbeit ebenfalls eine ungemein wichtige Rolle; dort versteht man unter Arbeit das Produkt, bestehend aus einer Kraft und der von dem Angriffspunkte der Kraft in der Richtung derselben zurückgelegten Wegeslänge. Da aber eine Kraft und eine zurückgelegte Wegeslänge ohne Stoff, als den Träger der Kraft und der durch sie veranlassten Bewegung, undenkbar sind, so kommt der Begriff der mechanischen Arbeit auf dasselbe hinaus, wie der der elektrischen Arbeit. Treten in verschiedenen Stromkreisen Arbeitswirkungen auf, so kann ein Maassstab für die Fähigkeit der Stromkreise, Arbeit hervorzubringen, nur durch Gegenüberstellung von in gleichen Zeiträumen entstandenen Arbeitsmengen gewonnen werden. Es wäre z. B. verfehlt, einem Stromkreis eine grosse Fähigkeit, Arbeit hervorzubringen, zuzuschreiben, wenn er zwar eine beträchtliche Gesammtmenge Arbeit liefert, dazu aber einen grossen Zeitraum in Anspruch nimmt. Ebenso verfehlt wäre es, einem Stromkreise eine geringe Fähigkeit, Arbeit hervorzubringen, zuzuschreiben, wenn er insgesammt nur eine kleine Arbeitsmenge liefert, diese jedoch innerhalb eines kleinen Zeitraumes. Am zweckmässigsten ist die Vergleichung sekundlicher Arbeitsmengen, wie dies in der Elektrotechnik gäng und gäbe geworden ist. Die sekundliche Arbeitsmenge führt die Bezeichnung Leistung[1]) und erhält, wie leicht einzusehen, ihren rechnungsmässigen Ausdruck durch das Produkt $E \times S$. Zur Messung der Leistung ist eine geeignete Maasseinheit festzulegen. Gebräuchlich als solche ist die Leistung, welche 1 V und 1 A zusammen ergeben. Gemäss dem Vorschlag des verstorbenen W. Siemens wurde für diese

[1]) Sehr oft wird für Leistung das Wort Effekt in Gebrauch genommen.

Einheit allgemein der Name Watt (abgekürzte Bezeichnung W) angenommen, womit dem berühmten, schottischen Ingenieur James Watt, dem Schöpfer der modernen Dampfmaschine, für alle Zeiten ein ehrendes Denkmal gesetzt war. Für sehr grosse Leistungen ergibt die Watteinheit unbequem grosse Zahlenwerte. Dieser Umstand brachte die weitere Einführung einer 100 und einer 1000 mal grösseren Einheit, des Hektowatts (H-W) und des Kilowatts (K-W) mit sich. Welche von diesen 3 Einheiten jeweils angewendet werden soll, bleibt Jedermann anheimgestellt. Mit der Bildung der Leistungsmaasseinheiten ging Hand in Hand auch diejenige entsprechender Arbeitsmaasseinheiten. Die gewählten Einheiten für die Leistung wurden beibehalten und noch ein passendes Zeitmaass hinzugefügt und zwar für kleine Arbeitsmengen eine Sekunde, für grosse, wie sie z. B. in einer elektrischen Zentrale aufzutreten pflegen, eine Stunde. Dementsprechend sind als Arbeitseinheiten die Wattsekunde[1]) (W-Sk), die Wattstunde (W-St), die Hektowattstunde (H-W-St) und die Kilowattstunde (K-W-St) eingeführt worden. Mit Berücksichtigung dieser Fülle von Einheiten und der rechnungsmässigen Bezeichnungen für Leistung und Arbeit, ergeben sich eine Anzahl Gleichsetzungen, welche im Interesse einer leichteren Orientirung nachstehend zusammengestellt sind.

Leistung	$= E \times S$	W
(Abgekürzte Bezeichung = 𝔏)		
	$= 0{,}01 \times E \times S$	H-W
	$= 0{,}001 \times E \times S$	K-W
Arbeit	$= E \times S \times T$ . .	W-Sk
(Abgekürzte Bezeichnung = 𝔄)		
	$= E \times S \times T_{st}$ . .	W-St
	$= 0{,}01 \times E \times S \times T_{st.}$ . .	H-W-St
	$= 0{,}001 \times E \times S \times T_{st}$ . .	K-W-St

Da die Unterschiede in den Leistungseinheiten rein dekadische sind, ist es ein Leichtes, Leistungen und Arbeiten auf die verschiedenen Maasseinheiten umzurechnen.

---

[1]) Für den Namen Wattsekunde wird sehr oft, namentlich in der Physik, der Name Joule aufgeführt.

Die bisherigen Betrachtungen zeigten, dass in dem aus Stromquelle, Leitung und Nutzapparat bestehenden Stromkreis durch die von der Stromquelle geschaffenen Spannung ein elektrischer Strom erzeugt wird, und dass dabei die Spannung eine von ihr und der Stromstärke abhängige Leistung hervorbringt. Die Stromquelle ist demnach in erster Linie die Ursache für die Arbeitsfähigkeit des Stromkreises. Enthält der Stromkreis, selbst in seinem Nutzapparat, nur Bestandteile von denen einzig und allein eine Wärmebildung verlangt wird, bezw. zu erwarten ist, so wird die gesammte Spannung zur Überwindung der Reibung der Stromkreisleiter und damit zur Erhaltung der Strombewegung dienen. Die Stromstärke wird, nach Maassgabe des Ohmschen Gesetzes, ebenfalls von der gesammten Spannung beeinflusst, und die entwickelte gesammte Leistung ausschliesslich zur Wärmebildung aufgebraucht. Enthält der Stromkreis jedoch einen Nutzapparat, in welchem die Wärmebildung nicht Mittel zum Zweck ist, z. B. einen Elektromotor und ist dieser in Thätigkeit, so ergeben geeignete Messungen die merkwürdige Thatsache, dass der in dem Stromkreis vorhandene Strom eine geringere Stärke besitzt, als sie das Ohmsche Gesetz erfordert. Ist das Ohmsche Gesetz falsch? Wenn nicht, was ist die Ursache dieser Inkonsequenz? Die richtige Antwort ist die Elektrotechnik nicht schuldig geblieben. Sie lautet: Sobald Einrichtungen in einem Stromkreis vorhanden sind, in denen nicht ausschliesslich Wärmewirkungen, sondern z. B. auch mechanische, chemische oder Lichtwirkungen auftreten, dient nicht mehr die gesammte Spannung zur Überwindung der Reibung und Aufrechterhaltung des Stromes, sondern nur ein Teil. Der andere Teil wird zur Überwindung der in diesen Einrichtungen neben der Reibung auftretenden andersartigen Gegenkräfte aufgebraucht. Ebenso wird die entwickelte gesammte Leistung nicht mehr ausschliesslich zur Wärmebildung herangezogen, sondern ein Teil erzeugt unter Umständen auch mechanische, chemische und Lichtwirkungen. Ja in Wechselstromkreisen tritt sogar der Fall ein, wie später noch ausführlicher dargelegt werden wird, dass ein mehr oder minder grosser Leistungsbetrag für einen Zeitaugenblick in die Umgebung der Stromkreisleiter wandert, um im nächsten wieder zurückzukehren und im darauffolgenden

schon wieder der Umgebung anzugehören. Dieses Wechselspiel der Leistung dauert solange, als der Strom in seinem Kreis zirkulirt. Welcher Natur die der Spannung entgegenwirkenden und Widerstandsleistungen vollbringenden Kräfte sind, lässt sich nur in ganz wenigen Fällen völlig einwurfsfrei nachweisen. In Stromkreisen, die Akkumulatoren oder Elektromotoren oder Bogenlampen enthalten, werden die Gegenkräfte allgemein als Gegenspannungen aufgefasst. Weniger Einigkeit herrscht bezgl. der in Wechselstromkreisen als Besonderheit auftretenden Gegenkräfte. Die Vertreter der hohen Wissenschaft machen aus denselben Gegenspannungen, die Vertreter der Praxis Widerstände. Was diese Doppelheit bisher bewirkte, war, dass ein an sich schon schwer verdauliches Gebiet, wie das des Wechselstroms, nach gewissen Richtungen beinahe völlig ungeniessbar wurde. Indessen gilt, ganz abgesehen davon, ob Gegenspannung oder Widerstand, allgemein die Thatsache, dass die Stromquellenspannung in erster Linie den auftretenden Gegenkräften das Gleichgewicht hält und in zweiter Linie, mit dem übrig bleibenden Betrag, in dem Ohmschen Widerstand, entsprechend dem Ohmschen Gesetz, die Stromstärke erzeugt. Eine Konsequenz dieser Thatsache ist die, dass ein von der Stromquelle ausgehender Strom nur möglich ist, wenn die Stromquellenspannung grösser als die Gegenkraft ist. Ist das Umgekehrte der Fall, dann kann unter Umständen ein Strom aus dem Nutzapparate in die Stromquelle fliessen; so z. B. bei einer Akkumulatorenbatterie, deren Spannung grösser ist, als die Spannung der sie ladenden Stromquelle.

Um in dem Stromkreis Wärme und durch die Nutzapparate mechanische, chemische oder Lichtwirkungen hervorzubringen, bedarf der elektrische Strom, gemäss den bisherigen Entwickelungen, der Fähigkeit elektrische Arbeit zu leisten. Diese Fähigkeit nimmt der elektrische Strom nicht aus sich selbst heraus, sondern er verdankt sie der Stromquelle. Die Thätigkeit der Stromquelle besteht in der Hervorbringung der Spannung; aufgewendet werden dazu, je nach dem Charakter der Stromquelle, mechanische, chemische oder Wärmekräfte. Die Wirkungen in den Nutzapparaten künden sich elektrisch durch das Auftreten der Leiterreibung und der Gegenspannung an; die Stromquellenspannung

hat ihnen das Gleichgewicht zu halten. In analoger Weise ist die Wirkung der Stromquelle durch die Entstehung einer der ursächlichen Stromquellenkraft qualitativ und quantitativ gleichen Gegenkraft charakterisirt. Die Heranziehung eines Beispiels wird etwas mehr Klarheit in diese Verhältnisse bringen. — Eine Dampfmaschine treibe eine elektrische Maschine an, welche durch eine entsprechende Leitung in Verbindung mit einer Bogenlampe und einem Elektromotor stehe. Der Elektromotor diene zum Antriebe einer Wasserpumpe. Die Dampfmaschine entwickelt mechanische Kraft, welche auf den rotirenden Teil der elektrischen Maschine einwirkt und diesen in Bewegung versetzt. Dabei leistet die Kraft mechanische Arbeit. In der elektrischen Maschine wird Spannung erzeugt, welche die Elektrizität zum Fliessen bringt und darin unterhält. Während des Fliessens verrichtet die Spannung elektrische Arbeit. Die Wirkung der elektrischen Maschine hat das Entstehen einer mechanischen Kraft zufolge, welche derjenigen der Dampfmaschine entgegenwirkt und ihr das Gleichgewicht hält. Der elektrische Strom fliesst durch die Bogenlampe und den Elektromotor. In der Bogenlampe wird Licht und Wärme, in dem Elektromotor eine mechanische Kraft erzeugt. Indem diese an dem beweglichen Teile der Pumpe angreift, wird Bewegung hervorgebracht und mechanische Arbeit geleistet. Die Wirkung der Bogenlampe und des Elektromotors äussert sich elektrisch zurück, indem in beiden Nutzapparaten Gegenspannungen auftreten, welche die Spannung der elektrischen Maschine überwinden muss.

Werden lediglich die Wirkungen in dieser Kette technischer Einrichtungen in Betracht gezogen, so umfassen dieselben die Hervorbringung von mechanischer Arbeit, elektrischer Arbeit, Wärme, Licht und wieder mechanischer Arbeit. Das Charakteristische bei dieser Hervorbringung ist der Umstand, dass das Auftreten der Wärme, des Lichtes und der mechanischen Arbeit an das Vorhandensein der elektrischen Arbeit und das Auftreten dieser, an das Vorhandensein der mechanischen Arbeit der Dampfmaschine gebunden ist. Das legt die Vermutung sehr nahe, dass diese verschiedenen physikalischen Erscheinungsformen nicht isolirt für sich bestehen, sondern eine aus der andern hervorgeht; Schöpfung der einen ist die Vernichtung der andern. Dieser



Anschauungsweise huldigt die moderne Naturwissenschaft in vollem Umfang; ja sie hat sogar in dieser Richtung noch einen grossen Schritt weiter gethan, indem sie die ausserordentlich wahrscheinliche Hypothese aufstellte, dass Licht, Wärme, mechanische und elektrische Arbeit lediglich verschiedene Formen eines und desselben Etwas sind, das sich in der Regel auf steter Wanderschaft befindet und bei seinen Spaziergängen bald ausgedehnte Massen, bald die Elektrizität, bald die kleinsten Teilchen der Stoffe als Wege benützt. Dieses Etwas nennt die Naturwissenschaft Energie. Da die Arbeit, die Wärme und das Licht Zustandsformen der Energie darstellen, bieten sie in ihren Mengen ein Mittel zum Messen der Energie. So ist z. B. die Menge der in einem Stromkreise geleisteten elektrischen Arbeit ein Maass für die durch die Stromquelle in den Stromkreis eintretenden Energie. Die Erfahrung zeigt, dass die Energie nicht immer im Wandern begriffen ist, dass sie oft den verschiedensten Stoffen im Zustand der völligen Ruhe anhaftet. Energie in dem Zustande der Ruhe, führt die Bezeichnung Energie der Lage oder potentielle Energie. Damit ist sie in Gegensatz zu der Energie der Bewegung oder der kinetischen Energie gesetzt. Sprengstoffe, Steinkohle, eine gespannte Feder, eine gehobene Last, eine Gewitterwolke, eine geladene Leydener-Flasche sind charakteristische Beispiele für das Vorhandensein potentieller Energie. Je nachdem sich die Energie ausgedehnter Massen, oder der Elektrizität, oder der kleinsten Teilchen der Stoffe als Wege oder Träger bedient, pflegt die Naturwissenschaft zwischen mechanischer Energie, elektrischer- und Lichtenergie, Wärme- und chemischer Energie zu unterscheiden. In dem obigen Beispiel erhalten demnach alle auftretenden Wirkungen durch die aufeinanderfolgende Umwandlung der mechanischen Energie, in elektrische und dieser in Wärme-, Licht- und wieder mechanische Energie eine ausserordentlich einfache Erklärung. Indem die Naturwissenschaft die Existenz der Energie annahm, war es ihr möglich eines der weittragendsten und fundamentalsten Naturgesetze, das Gesetz der Erhaltung der Energie, aufzufinden. Diese vornehmste Errungenschaft des 19. Jahrhunderts ist das unbestreitbare Verdienst des Heilbronner Arztes Robert Meyer, welcher im Jahre

1842 seine Entdeckung in Form einer kleinen Schrift in die Welt hinaussandte, allerdings ohne vorerst Anklang damit zu finden. Das Gesetz lautet: Die Energie bleibt in den verschiedenen Erscheinungsformen, also trotz aller Qualitätsänderungen, quantitativ stets dasselbe. Auf das gewählte Beispiel angewendet, besagt dieses bewunderns-wert einfache Gesetz folgendes: Indem die Dampfmaschine auf die elektrische Maschine mechanische Arbeit überträgt, verschwindet die derselben entsprechende mechanische Energie. Sie geht als quantitativ gleichbleibende elektrische Energie in den Stromkreis über und zwar in der Erscheinungsform der elektrischen Arbeit. Aber auch die elektrische Energie verschwindet bei ihrer Arbeitsleistung, um in der Bogenlampe und dem Elektromotor als Wärme-, Licht- und mechanische Energie in quantitativ nach wie zuvor gleichbleibenden Verhältnissen aufzutreten und zwar in der Form von Wärme, Licht und mechanischer Arbeit. Indem die Energie bei ihrer Wanderung sich quantitativ stets gleichbleibt, ergibt das für die quantitativen Verhältnisse ihrer Zustandsformen unter anderem zwei bedeutungsvolle Folgerungen. Die eine besagt, dass in einer noch so grossen Reihe von Zustandsformen, welche die Energie bei ihrer Wanderung nacheinander annehmen kann, die gleichen Formen immer wieder in derselben Anzahl Mengeneinheiten hervorgehen. So wird eine Energie, welche in Form von elektrischer Arbeit 1000 Wattstunden zu leisten im Stande ist, diese wiederum hervorbringen, wenn sie im weitern Verlaufe ihrer Wanderung erneut in dieser Zustandsform auftritt. Die andere Folgerung gipfelt darin, dass einer beliebigen Menge einer Zustandsform eine ganz bestimmte Menge einer andern gleichwertig sein muss. Durch die zahlenmässige, experimentelle Feststellung der gleichwertigen Mengen der verschiedenen Energieformen wird diese Folgerung und damit ohne Frage auch das ganze kunstvolle Gebäude der Energielehre Bestätigung und folglich die Berechtigung zum Dasein erhalten. Vorerst ist die exakte Feststellung gleichwertiger Zahlen nur für die elektrische und mechanische Arbeit, sowie für die Wärme gelungen. Zur erspriesslichen Benützung, ohne Gefahr von Missverständnissen in der Auffassung, sind nur diejenigen Zahlen geeignet, welche den Einheiten der ver-



schiedenen Energieformen, insbesondere den Leistungseinheiten, entsprechen. Diese Einheiten haben, bis auf die mechanische Leistungseinheit, alle bereits Erwähnung gefunden. Was die mechanische Leistungseinheit anbetrifft, so hat die Technik deren zwei in Gebrauch genommen und zwar das Kilogrammmeter (kgrm) und das 75 fache, die Pferdestärke (P-S). In der nachfolgenden Tabelle sind die den verschiedenen Einheiten entsprechenden gleichwertigen Zahlen zusammengestellt. Dieselbe ist so angelegt, dass die fettgedruckten Einheitszahlen jeweils derjenigen Energieformeinheit angehören, welche senkrecht oben am Tabellenkopfe steht. Die zugehörigen gleichwertigen Zahlen liegen mit der fraglichen Einheitszahl auf derselben Horizontallinie. Die Einheiten, in welchen sie auszudrücken sind, müssen ebenfalls senkrecht oben am Kopfe abgelesen werden.

Tabelle der gleichwertigen Zahlen.

Watt W	Hektowatt H-W	Kilowatt K-W	Kilogrammmeter kgrm	Pferdestärke P-S	Gramm-Calorie gr-Cal.	Kilogramm-Calorie kgr-Cal.
1	0,01	0,001	$\frac{1}{9,81}=0,102$	$\frac{1}{736}$ 0,00136	0,24	0,00024
100	**1**	0,1	10,2	0,136	24	0,024
1000	10	**1**	102	1,36	240	0,24
9,81	0,0981	0,00981	**1**	$\frac{1}{75}$ 0,0133	2,36	0,00236
736	7,36	0,736	75	**1**	177	0,177
4,17	0,0417	0,00417	0,424	0,00565	**1**	0,001
4170	41,7	4,17	424	5,65	1000	**1**

Ein Einblick in die Tabelle zeigt z. B., dass der mechanischen Leistung von 1 P-S eine elektrische Leistung von 736 W oder eine Wärmemenge von 177 gr-Cal. entspricht. Eine maschinelle



Anordnung, welche eine aufeinander folgende, vollkommene Umwandlung von mechanischer Leistung in elektrische und von dieser in Wärme ermöglicht, wird eine solche Umwandlung in diesen Mengenzahlen ergeben.

Haben die einzelnen Bestandteile der maschinellen Anordnung lediglich dem Zweck der Energieumformung zu dienen, dann ist demselben mit der Erreichung dieser Mengenzahlen in idealster Weise entsprochen. Die praktische Technik strebt einem solchen Ziele zwar zu, hat es aber bis heute noch nicht erlangen können. Es liegt gewissermassen in dem Charakter aller technischen Einrichtungen, dass sie den mit ihnen beabsichtigten Zweck nur unter Inkaufnahme eines verschieden grossen Energieverlustes ermöglichen. Dieser Energieverlust ist nicht in dem Sinne eines völligen Verlorengehens der Energie zu verstehen, sondern in dem des nebenbei Auftretens von Energieformen, welche für den verfolgten Zweck keinen Nutzen stiften. So entsteht z. B. in einer jeden elektrischen Maschine bei der Umwandlung der mechanischen in elektrische Leistung Wärme, welche, da sie zu ihrer Bildung eines Teiles der verfügbaren mechanischen Leistung bedarf, die Menge der erzielten elektrischen Leistung herabdrückt. Ohne Frage wird die Grösse dieses Energieverlustes das wesentlichste Kriterium für die Güte aller jener Einrichtungen sein, welche eine Energieumformung bezwecken. Zweckmässigkeitsgründe von leicht zu übersehender Natur haben die Veranlassung geboten, diesem Kriterium die Form eines Bruches zu geben, dessen Zähler der nutzbaren und dessen Nenner der verfügbaren Energie bezw. Energieform entspricht. Dieser Bruch führt den Namen Güteverhältniss oder Wirkungsgrad und wird allgemein durch den griechischen Buchstaben η (Eta) abgekürzt bezeichnet. Es ist demnach

$$\eta = \frac{\text{nutzbare Energie}}{\text{verfügbare Energie}}.$$

η ergibt einen Dezimalbruch, welcher sinngemäss stets kleiner als Eins sein muss. Wird dieser Dezimalbruch mit 100 vervielfacht, dann ist η in Prozentform ausgedrückt. Es sind beide Darstellungsweisen erlaubt und gebräuchlich. Die Kenntniss der Grenzen, innerhalb welcher sich der Wirkungsgrad bei den Be-

standteilen elektrischer Anlagen zu bewegen hat, ist nicht Gegenstand dieses Werkchens. Der hohe Wirkungsgrad einer maschinellen Einrichtung befähigt dieselbe nicht, wie man irrtümlich annehmen könnte, zur Umwandlung jeder beliebig grossen Energiemenge. Eine jede Einrichtung ist für ein bestimmtes maximales Maass von Energieform geschaffen, über das hinaus eine Beanspruchung nur auf die Gefahr der Zerstörung hin zu riskiren ist. Je intensiver die Bestandteile der Einrichtung bei dieser maximalen Inanspruchnahme beteiligt sind, desto mehr spricht das für eine sorgsame Verwendung aller jener Erfahrungen, welche unter anderm die räumliche Ausdehnung, das Gewicht und den Preis bestimmen und ein Kriterium abgeben für etwas, was sich vielleicht mit dem Namen Ausnützungsfähigkeit treffend charakterisiren lässt. Die Verwendung von Eisen und Stahl in einer grossen Anzahl elektrischer Apparate lässt sich zu einem guten Beispiel für die Bedeutung der Ausnützungsfähigkeit an. Diese Ausnützungsfähigkeit, im Verein mit dem Wirkungsgrad, bilden die Hauptgesichtspunkte, unter welchen eine ausreichende technische Beurteilung zu erfolgen hat. Die bisherigen Betrachtungen, welche an den Energiebegriff geknüpft wurden, werden durch ein passend gewähltes Zahlenbeispiel einen vorteilhaften Abschluss erhalten. Als Gegenstand des Beispieles diene die auf Seite 50 aufgeführte maschinelle Einrichtung.

Beispiel. Aufgabe. Die Dampfmaschine übertrage auf die elektrische Maschine eine mechanische Leistung von 25 P-S. Die gelieferte elektrische Leistung betrage 15 800 W. Der Energieverlust in der Leitung, infolge der Wärmebildung, sei 1200 W. Die Bogenlampe beanspruche zu ihrem Funktioniren 800 W und der Wirkungsgrad des Elektromotors beziffere sich auf 0,82. Wie gross ist der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine, in $^0/_0$ ausgedrückt; und wieviel P-S darf die Pumpe höchstens beanspruchen, um von dem Elektromotor betrieben werden zu können?

Lösung. Könnte die gesammte mechanische Leistung von 25 P-S in elektrische umgewandelt werden, dann müssten, da nach der Tabelle 1 P-S 736 W entspricht, von der elektrischen Maschine $25 \times 736 = 18\,400$ W geleistet werden. Da aber die elek-

trische Maschine nur 15 800 W liefert, ist ein Minus von 2600 W zu verzeichnen, welches einem prozentuellen Wirkungsgrad von $100 \times \frac{15\,800}{18\,400}$ = rund 86 % entspricht. Von den 15 800 W elektrischer Maschinenleistung werden nur 15 800 — (1200 + 800) = 13 800 W in dem Elektromotor umgesetzt und von diesen, unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Elektromotors, wiederum nur 0,82 × 13 800 = rund 11 300 W in nutzbare mechanische Leistung. Da nach der Tabelle 1 W einer mechanischen Leistung von 0,00136 P-S entspricht, so beträgt diese Leistung 0,00136 × 11 300 = rund 15,4 P-S. Soviel Pferdestärken darf die Pumpe in Maximum in Anspruch nehmen.

Abschnitt III.

Die Wirbelbewegung und ihre Gesetze. Feilspähngruppirungs- und Bewegungsbestreben stromdurchflossener Leitergebilde und die Ursache desselben. Kraftlinie und elektrisches Feld. Die elektrische Feldstärke, ihre Maasseinheit und Grösse bei den verschiedenen Leiterformen. Die magnetischen Stoffe; ihre Beschaffenheit und ihre Wirkungen in Feldern. Das elektromagnetische Feld. B- und μ-Kurven. Hysteresis. Form von elektromagnetischen und magnetischen Feldern. Magnetnadel. Bügelmagnet. Das elektromagnetische Ringfeld mit Luftspalten. Berechnung desselben, mit einer dem Ohmschen Gesetz ähnlichen Gleichsetzung. Streuung. Quantitative Ermittlung der bewegenden Kräfte von Wirbelfeldern.

Die Darlegung der ersten zwei Abschnitte suchten der Hauptsache nach Verständniss für die Vorgänge in den Stromkreisleitern zu erwecken; die fliessende Elektrizität war das durch die ganze Kette von Thatsachen, Begriffe und Anwendungen sich hindurchwindende Band. Das, was sich jetzt anschliesst, fusst in erster Linie auf der Erkenntniss, dass auch die Umgebung stromdurchflossener Leiter Vorgänge aufzuweisen hat, welche für die Elektrotechnik von ebenbürtiger Tragweite sind. Nur diese dürften geeignet sein, eine befriedigende Vorstellung von dem zu geben, was sich bei der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische und von mechanischer in elektrische abspielt; nur ihrer Erkennung ist der verständnissvolle Bau elektrischer Maschinen zuzuschreiben. Das Thatsachenmaterial, das sich im Laufe der Jahrzehnte über diesen Gegen-

stand ansammelte, hat den Umfang eines Berges angenommen; die Verarbeitung hat damit nicht Schritt gehalten, namentlich nicht hinsichtlich der Herausgestaltung einer rationellen Lehre. Die landläufige Behandlungsart pflegt vornehm die unantastbaren Thatsachen herauszustreichen; das geistige Band das Alles umschlingt, ist von beschämender Kürze. Der praktische Elektrotechniker hat seine brauchbaren und erprobten Methoden und Anschauungen zur Lösung ihn fesselnder Probleme; sollte sich ein Leserkreis, wie der hier gewünschte, damit befreunden, so würde ohne Zweifel sein Glauben als Verdauungsferment sehr in Anspruch genommen werden. Er bedarf billigerweise eines Hülfsmittels, das ihm im weitern Verfolgen ungefähr dasselbe leistet, wie die fliessende Flüssigkeit bei den Vorgängen in den Leitern. Ein solches Hülfsmittel ist aber sehr bald gewonnen, wenn nur der schon auf Seite 3 gegebenen Anschauung, dass Elektrizität allüberall, also auch in der Umgebung stromdurchflossener Leiter, vorhanden ist, Rechnung getragen wird. Denn dann drängt sich, bei dem eigentümlichen Charakter der in dieser Umgebung stattfindenden Vorgänge, mit grosser Ueberzeugungskraft die Vorstellung auf, dass der Strom in den Leitern diese sie umgebende Elektrizität in wirbelnde Bewegung versetzt. Wirbelnde Ringe, von ausserordentlich geringer Querschnittsausdehnung, welche die Leiter in grosser Menge vollkommen umschliessen, müssen als die eigentlichen Veranlasser der Vorgänge angesehen werden. Dieses Hülfsmittel verdient nicht etwa den Geburtsort Wolkenkukuksheim. Es gibt und gab eine Menge um die elektrische Wissenschaft hochverdienter Männer mit der vollen Ueberzeugung von der Existenz solcher Wirbelringe. Leider ist es bis heutigen Tages noch nicht gelungen, diese Existenz experimentell nachzuweisen.

Ehe eine sachliche Begründung für die Notwendigkeit der Erschaffung der Wirbelvorstellung gegeben wird, ist es sehr angezeigt, in gedrängter Form die allgemein für Wirbelbewegungen geltenden mechanischen Gesetze zu untersuchen, welche bei jeder beweglichen Masse, also bei Wasser, Luft, Rauch, Elektrizität u. s. w. in Thätigkeit treten.

Zum Studium von Wirbelbewegungen eignet sich Wasser, welchem Sägespähne zugesetzt sind. Wird in einer solchen



Wassermasse ein Wirbelring erzeugt, dessen Idealform die nachstehende Fig. 12 verkörpert, so fällt an ihm in erster Linie auf, dass er bei dem Fortschreiten in der übrigen Wassermasse stets von denselben Wasserteilchen gebildet wird. Diese reissen demnach nicht neue Wasserteilchen mit sich, sondern wandern ohne gegenseitige Störung zwischendurch. Daraus folgt, dass Wirbelringe verschiedener Grösse und Geschwindigkeit nebeneinander und ineinander auftreten können, ohne sich gegenseitig in ihrer Bewegung zu beeinflussen. Aehnliches ist an den vielbeliebten Ringeln kunsterfahrener Raucher zu beobachten. Die Eigenschaft der Wirbelbewegung, an die einmal ergriffenen Stoffe gebunden zu bleiben und mit diesen fortzuschreiten, ist von fundamentaler Wichtigkeit. Sie ist aber nicht nur der Ringform, wie sie die Fig. 12 zeigt, eigen, sondern sie hat auch Gültigkeit für beliebig geformte Ringe, ja schon für Ringteile. Ein erzeugter Wasserwirbelring verlangsamt allmählich seine Bewegung und hört schliesslich ganz auf Wirbelring zu sein. Die Ursache der Verlangsamung und der Vernichtung der Wirbel-Bewegung liegt in der hemmenden Wirkung der Reibung, welche bei den verschiedenen Bewegungszuständen der Wassermasse in dieser auftritt. Je mehr der Einfluss der Reibung verschwindet, desto mehr tritt bei dem Wirbelring die Absicht hervor, seine Bewegung in alle Ewigkeit beizubehalten. Bei elektrischen Wirbeln ist in gewissen Fällen die Veranlassung

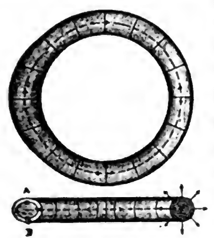


Fig. 12.

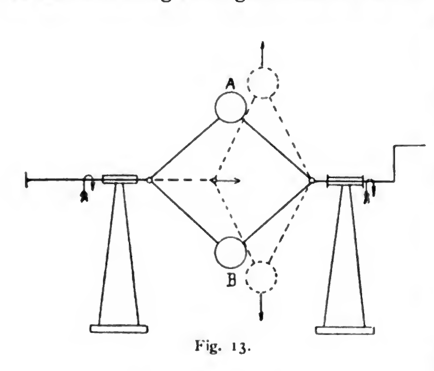


Fig. 13.



geboten, diesen eine Dauer ohne Ende zuzuschreiben. Werden zwei von den den Wirbelring bildenden Wasserteilchen abgesondert (z. B. A und B, in der Fig. 12) und wird die Möglichkeit angenommen, sie als Schwungkugeln in einem dem Dampfmaschinenregulator ähnlichen Mechanismus verwenden zu können (Siehe Fig. 13), so zeigt sich bei eingeleiteter Achsendrehung das Bestreben, die Achse zu kürzen und die Kugeln von ihr zu entfernen. Da sich die Achse in dem einen Lager verschieben kann, so gibt sich dieses Bestreben durch die Verschiebung der Kugeln in die gestrichelte Lage kund. Erklärlich wird diese Lagenänderung, sobald als Folge der Drehbewegung das Entstehen einer Zugspannung längs der Achse und einer Druckspannung senkrecht zur Achse zur Annahme gelangt. Solche Zug- und Druckspannungen werden überall auftreten, wo Drehbewegungen vorhanden sind; auch der Wasserwirbelring hat diese Kräfte in sich wirken. Sie suchen ihn radial anzuschwellen und achsial zusammenzuziehen. In der Fig. 12 kennzeichnen die Pfeile längs der gestrichelten Drehachse und radial an einer Querschnittstelle diese Absicht.

Von bedeutsamer Wirkung werden die Zug- und Druckspannungen, sobald sie bei ineinanderliegenden Wirbeln in Frage kommen. Diese Wirbel stören sich in ihrer Bewegung nicht, und doch ist eine Änderung in der Grösse der Kraftwirkung wahrnehmbar, welche in einer Verstärkung der Zug- und Druckspannung besteht, wenn die Wirbel gleichen Drehsinn haben, hingegen in einer Schwächung bei entgegengesetztem Drehsinn. Die Kräfte können sogar ganz verschwinden, wenn vollkommen gleichartige Wirbel entgegengesetzt ineinander liegen. Nebeneinander liegende Wirbel stören sich auch nicht in ihrer Bewegung; das hindert sie aber nicht, ein gegenseitiges, durch die Druckspannungen veranlasstes Abstossungsbestreben an den Tag zu legen. Die Geschwindigkeit der Wirbelbewegung bestimmt die Grösse der Spannungen; sie selbst ist von den qualitativen Verhältnissen des den Wirbel veranlassenden Impulses und von der Wassermenge, welche sich an dem Wirbel beteiligt, abhängig.

Damit wäre eine kurze Darstellung der allgemeinen Eigenschaften von Wirbelbewegungen gegeben. Ehe davon Gebrauch gemacht wird, sollen einige Erscheinungen, die in erster Linie

auf das Vorhandensein elektrischer Wirbel in der Umgebung stromdurchflossener Leiter hinweisen, in dem üblichen experimentellen Gewande angeführt werden.

Ein geradliniges Leiterstück, welches mit einer Stromquelle in Verbindung steht, werde senkrecht durch die Mitte eines ebenen, in horizontaler Lage gehaltenen Kartons gesteckt und zwar derart, dass es sich ohne Erschütterung desselben verschieben lässt. Auf dem Karton werde eine dünne Schicht Feilspähne gleichmässig verteilt. Solange kein Strom zirkulirt, liegen die Feilspähne regellos. In dem Augenblick des Stromkreisschlusses macht sich jedoch bei den Feilspähnen das Bestreben nach einer Gruppirung in konzentrisch zu dem der Kartonebene angehörenden Drahtquerschnitt liegenden Kreisen bemerklich, welches durch vorsichtiges Beklopfen des Kartons erheblich unterstützt wird. Diese Gruppirung zeigt sowohl die Draufsicht der in der Fig. 14 gebotenen Naturwiedergabe, als auch der Grundriss der Versuchsanordnung mit den sprungweis eingetragenen Gruppirungslinien in der Fig. 15. Auffällig ist, dass das Gruppirungsbestreben der Feilspähne in der Nähe des Leiters am ausgeprägtesten ist und über die ganze Kartonfläche hinweg mit der Steigerung der Stromstärke eine Zunahme erfährt. Ein vorsichtiges Verschieben des Drahtes in der Öffnung bringt denselben mit allen Querschnitten in die Kartonebene. Eine quantitative Änderung in der Feilspähnanordnung ist hiebei nicht beobachtbar, was zu dem Schlusse führt, dass das Gruppirungsbestreben längs des ganzen Leiters in gleicher Stärke auftritt. — Wird ein zweiter Leiter in angemessenem Abstande parallel zum ersten durch den Karton gesteckt und der Strom einmal in entgegengesetzter und einmal in gleicher Richtung wie im ersten Leiter durchgesandt, so ergeben sich die Feilspähngruppirungen der

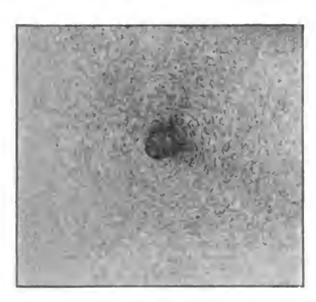


Fig. 14.

Fig. 16. Fig. 18. Fig. 21. Fig. 20.

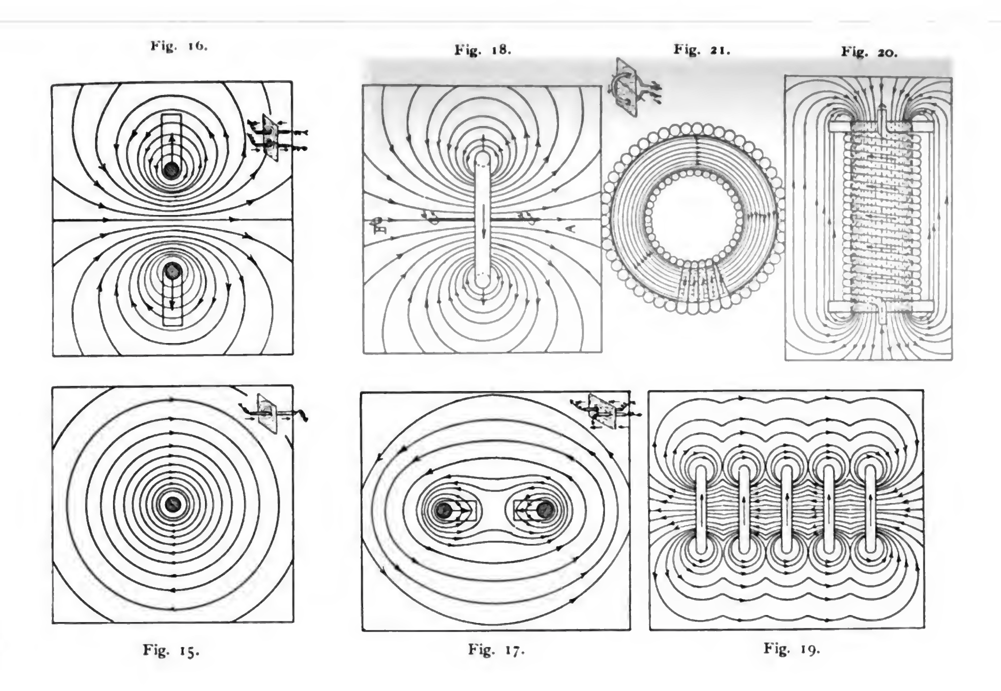


Fig. 15. Fig. 17. Fig. 19.

Figuren 16 und 17. Von konzentrischen Kreisbildungen ist nichts mehr zu erkennen. In Fig. 16 sind aus den konzentrischen Kreisen einseitig verschobene, kreisähnliche Kurven geworden, die zwischen und in der Nähe der Leiter am dichtesten gruppirt sind. In Fig. 17 sind die Kreise zu ellipsenförmigen Gebilden ineinander verschmolzen, ihre Anordnung ist aussen und wiederum in der Leiternähe am dichtesten. Auch bei dieser Leiteranordnung zeigt das Experiment eine Erhaltung des Gruppirungsbestrebens der Feilspähne längs den Leitern und eine Verstärkung mit der Zunahme der Stromstärke. Werden die Leiter der Fig. 16 zu einem an einer Stelle knapp geöffneten, stromdurchflossenen Kreisring zusammengebogen, dann ergibt der Versuch eine mit der in Fig. 16 völlig gleichartige Feilspähnanordnung (Siehe Fig. 18). Eine Drehung des Ringes um eine gedachte Achse AB ändert an der Gruppirung nichts, woraus ein dem Kartonbilde entsprechendes, allseitig symetrisches Anordnungsbestreben abgeleitet werden kann. Auffällig ist daran,. dass alle den Ringquerschnitt durchsetzenden Kurven denselben senkrecht treffen. Werden mehrere, in gleicher Richtung stromdurchflossene Ringe parallel zueinander aufgestellt, so ist das eine Anordnung, welche gewissermaassen aus einer Vereinigung der in Fig. 16 und 17 gegebenen Leiteranordnungen hervorgeht. Dementsprechend ist auch die Feilspähngruppirung von dem Charakter eines die Gruppirungen der Fig. 16 und 17 in sich vereinigenden Bildes (Siehe Fig. 19). In dem von den Ringen gebildeten Hohlraum ist ein Anordnungsbestreben in parallel zur Ringachse verlaufenden Linien unverkennbar. Diese so geartete Liniengruppirung ist in der Ringnähe am intensivsten und nimmt demnach gegen die Achse zu ab. Indem die Ringe nicht in getrennter Form, sondern in der von dicht nebeneinander liegenden Windungen einer geradachsigen Spirale, wie sie Fig. 20 im Grundriss darstellt, zur Untersuchung herangezogen werden, ist die parallele Liniengruppirung im Spiraleninnern schon so ausgeprägt, dass die anwendende Praxis ein vollkommenes Gleichlaufen mit der Achse anzunehmen pflegt. Wird die Spirale derart gebogen, dass die geradlinige Achse die Gestalt eines korrekten Kreises annimmt, dann formt sich dieselbe zu dem in Fig. 21 dargestellten, geschlossenen Leiterring um. Das jetzt schwer

darstellbare Feilspähnbild zeigt die Merkwürdigkeit, dass ein Gruppirungsbestreben nur noch im Ringinnern vorhanden ist; ausserhalb bleiben die Feilspähne, auch bei starken Ringströmen, vollkommen regellos liegen. Im Innern suchen sich die Feilspähne in zu der Ringachse konzentrischen Kreisen anzuordnen.

Ausser diesem Gruppirungsbestreben der Feilspähne in der Umgebung stromdurchflossener Leiter, zeigen sich noch andere, nicht minder wichtige und überraschende Erscheinungen. Wird nämlich den beiden, geradlinigen Leitern in Fig. 16 und 17 die Möglichkeit einer vollkommenen Bewegungsfreiheit gegeben, dann machen dieselben, bei Stromkreisschluss, einen sofortigen Gebrauch davon und zwar in der Weise, dass sich die Leiter mit ungleichgerichteten Strömen von einander entfernen, die mit gleichgerichteten Strömen einander nähern. Die parallele Lage der Leiter ändert sich bei dieser Bewegung nicht, woraus zu folgern ist, dass die Bewegungsantriebe senkrecht zur Leiterachse erfolgen (Siehe Fig. 16 und 17). Für einen Leiterring ergibt dieser Bewegungsantrieb ohne Zweifel das Auftreten eines allseitig radialen Ausweitungsbestrebens, dem er bei elastischer Konstitution bis zu einem gewissen Grade Folge leisten wird. Eine Spirale wird sich ebenfalls senkrecht zur Achsenrichtung auszudehnen versuchen, in der Achsenrichtung hingegen, in Anlehnung an den Bewegungsantrieb gleichgerichteter Leiter, ein Zusammenziehen der Windungen anstreben.

Mit diesen gegebenen Beweisen von dem Dasein besonderer Vorgänge in der Umgebung stromdurchflossener Leiter ist zwar etwas praktisch Verwertbares, aber kein Erkennen der wahren Natur dieser Vorgänge geschaffen. Aus den Thatsachen, dass ein Strom Richtungskräfte an Eisenfeilspähnen bethätigen kann, deren Gleichgewichtszustand durch die skizzirten Bilder charakterisirt ist, und dass Ströme gegenseitig bewegungsversuchend auf ihre körperlichen Bahnen einwirken, hat die Praxis durch geeignete Verwendung und Erweiterung viel Kapital zu schlagen verstanden. Ob die richtenden und bewegenden Kräfte eines Ursprunges sind, wessen Wirken sie ihr Dasein zu verdanken haben und noch vieles Anderes, hat die Praxis unerörtert gelassen. Vereint mit dem wissenschaftlichen Laboratorium, hat sie ein einschlägiges Thatsachenmaterial zu einem Lehrgebäude zusammen-

getragen, das, wie das Konglomerat, die widersprechendsten Gebilde friedlich nebeneinander bestehen lässt. Ordnung und Klarheit kann nur geschaffen werden mit der Erkennung und Anwendung der Grundursache. Wie bereits angedeutet, sind die neuesten Bestrebungen dahin gerichtet, sie in dem elektrischen Wirbel verkörpert zu sehen. Im Lichte der Wirbellehre betrachtet, werden die in der Leiterumgebung stattfindenden Vorgänge eine durchsichtige und befriedigende Erklärung erhalten. Im Nachstehenden soll versucht werden, dies sachlich zu begründen.

Jede durch das Gruppirungsbestreben der Eisenfeilspähne entstehende, den Leiter umgebende Linienbildung werde als mit der Drehachse eines in seinen Querschnittsdimensionen ausserordentlich kleinen Elektrizitätswirbelringes zusammenfallend angesehen. Diese Vorstellung ist in der Fig. 22 an einem der konzentrischen Kreise der Fig. 15 verbildlicht. Nach den allgemeinen Wirbelgesetzen wirken längs den Drehachsen Zugspannungen und senkrecht dazu Druckspannungen. Diese Kräfte sind demnach den Linienbildungen beizuordnen; sie müssen, wenn die Wirbellehre ihre Richtigkeit haben soll, genügen, um alle in der Leiterumgebung auftretenden Erscheinungen zu erklären. Insofern die Kräfte längs und senkrecht zu diesen Linienbildungen wirken, sind letztere ein bequemes Mittel, um sich für jeden Ort in der Leiterumgebung über die räumliche Lage der auftretenden Zug- und Druckspannungen zu orientiren. Diese hervorragende Eigenschaft der Linienbildungen wurde sehr frühzeitig erkannt; um ihr äusserlich Rechnung zu tragen, wurden die Linien, längs welchen sich die Eisenfeilspähne anordnen, Kraftlinien genannt, eine Bezeichnung, welche von nun ab auch hier Verwendung finden soll. Linienbildung,

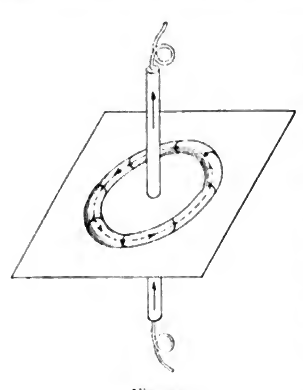


Fig. 22.

Wirbeldrehachse und Kraftlinie sind als sich deckende Begriffe im Gedächtnisse zu behalten. Der gesammte, von Kraftlinien erfüllte Raum, welcher die Leiterumgebung verkörpert, wird, in Anlehnung an den Wortgebrauch Kraftlinie, elektrisches Kraftfeld oder kurzweg elektrisches Feld genannt.

Mit diesen Wesensfestlegungen ist in erster Linie über die Ursache des Gruppirungsbestrebens der Feilspähne Erklärung geschaffen. Ohne Frage ist dieses eine Folge der Anwesenheit der längs den Kraftlinien wirkenden Zugspannungen. Die durch das Experiment gefundene und in den Grundriss-Bildern angedeutete Auffälligkeit, dass das Feilspähnanordnungsbestreben in unmittelbarer Leiternähe am ausgeprägtesten zu Tage tritt, ist zum Teil auf die Druckspannungen der Wirbelringe zurückzuführen. Diese veranlassen die Wirbelringe, sich gegenseitig nach Möglichkeit zu verdrängen. In der Richtung von dem Leiter weg, ist ein Ausweichen geboten; in der Richtung zu dem Leiter hin, wird wohl oder übel ein Zusammendrängen der Wirbel eintreten. Bei gleichem Drehsinn der Wirbelringe muss sich dadurch, gemäss den Darlegungen auf Seite 60, eine Verstärkung der Zugspannungen und somit auch des Gruppirungsbestrebens einstellen. Am reinsten tritt diese Erscheinung an dem in der Fig. 15 dargestellten elektrischen Feld hervor. Der vorausgesetzte gleiche Drehsinn der den Leiter umgebenden Wirbelringe enthält nichts Willkürliches; eine Hindeutung auf die Art und Weise, in der ein stromdurchflossener Leiter seine wirbelanregende Eigenschaft bethätigt, führt ohne weiteres zu der Annahme eines solchen. Der Strom wirkt, wenn ein mechanischer Vergleich gestattet ist, zahnstangenartig auf die in der Umgebung vorhandene Elektrizität ein. Diese ist aus einer Unmenge zahnradartiger Bestandteile bestehend zu denken, die, so lange sie sich drehend bewegen, die Bausteine der leiterumgebenden Wirbelringe repräsentiren. Diese Bestandteile greifen ungefähr in der in Fig. 23 dargestellten Anordnungsart ineinander. Die schraffirten Zahnräder haben die Bedeutung von Hülfsmechanismen und kommen für die Feldwirkungen nicht in Frage. Indem sich die Zahnstange fortschiebt, also der Strom fliesst, versetzt sie die den Leiter ringsumgebenden Räder in Drehung. Die Drehungsrichtung sämmtlicher unschraffirter Räder ist, wie die Fig. 23 klar erweist



in Uebereinstimmung mit der Zahnstangenverschiebungsrichtung, also durchweg gleichen Charakters. Da die wirbelnden Räder den Leiter allseitig umgeben, erklärt sich daraus das in den Figuren erkenntliche Umschliessen des Leiters von den Linienbildungen. Der Beginn und das Aufhören der Wirbelbewegung ist, dem mechanischen Bilde entsprechend, an den Beginn und das Aufhören der Zahnstangenbewegung gebunden. Der Versuch bestätigt dies: Mit der Stromkreisschliessung beginnt sofort das Gruppirungsbestreben, um mit der Stromkreisöffnung wieder zu verschwinden. Der Bewegungsimpuls, welcher von dem Strom in die Umgebung übergeht, erfasst bei seiner Ausbreitung immer mehr an Gesammtmasse zunehmende Wirbelringe. Nach einem der Fundamentalgesetze der Mechanik bedingt das eine stete Abnahme der Wirbelgeschwindigkeit; das elektrische Feld wird demnach in einer gewissen Entfernung von dem Leiter sein Ende erreichen und zwar dort, wo der Wirbel eine nicht mehr nachweisbare Geschwindigkeit besitzt. Mit dieser stetigen Abnahme der Wirbelgeschwindigkeit ist übrigens noch eine zweite Ursache für das ungleich starke Anordnungsbestreben der Eisenfeilspähne gekennzeichnet.

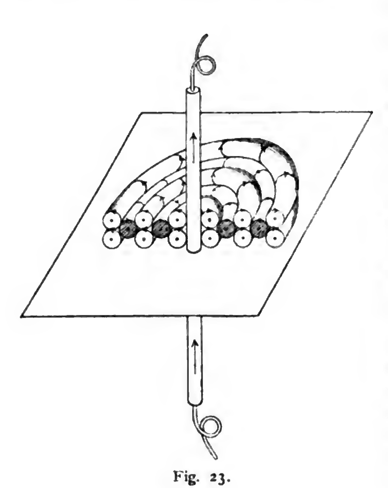


Fig. 23.

Die Richtung der Wirbelbewegung ist bei Kenntniss der Stromrichtung leicht zu übersehen, insofern die dem Leiter zugewandten wirbelnden Teile dieselbe Richtung wie der Strom haben. Wird von den Wirbelringen abgesehen und werden lediglich an die Kraftlinien Betrachtungen geknüpft, so müssen diesen, um der Möglichkeit des Wirbelns in oder entgegen der Bewegungsrichtung eines Uhr-

zeigers Rechnung zu tragen, eine **Richtung** beigelegt werden. Gemäss Uebereinkommen gilt zwischen Wirbel- und Kraftlinienrichtung die Regel: Ein Auge, das einem Wirbelquerschnitt zugewandt ist, und bei diesem die Bewegungsrichtung eines Uhrzeigers vorfindet, sieht gleichzeitig **in die Richtung** der Kraftlinien. (Siehe Fig. 24.) Die Regel, welche zwischen Strom- und Kraftlinienrichtung bestehen wird, lässt sich hieraus ohne weiteres ableiten: **Ein Auge, das der Stromrichtung entlang sieht, findet die Kraftlinien mit einer Richtung behaftet, welche der Bewegungsrichtung eines Uhrzeigers entspricht.** (Siehe Fig. 24.) Entsprechend dieser Regel sind die Kraftlinien der Figuren 15 und folgende mit Pfeilen versehen worden, und empfiehlt es sich, zur Einübung der Regel die Figuren einer Richtigkeitsprüfung zu unterziehen. Der Vorteil des Richtens der Kraftlinien liegt in der damit gewonnenen Ermöglichung des leichten Erkennens, ob zwei ineinander fallende Kraftlinien eine grössere oder kleinere Gesammtwirkung zu Tage fördern. Einen Nachteil bringt allerdings das Ausrüsten der Kraftlinen durch Pfeile mit sich, insofern stets grosse Neigung vorhanden ist, die Zugspannungen lediglich in dieser Richtung, anstatt auch gleichzeitig in der entgegengesetzten, wirkend anzunehmen.

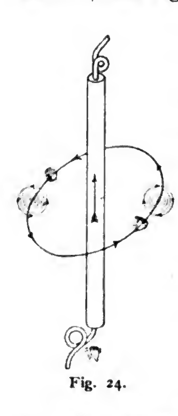


Fig. 24.

Da es in dem Wesen der Wirbelbewegung liegt, an die einmal ergriffenen Stoffe gebunden zu bleiben, so wird eine eingeleitete Ortsveränderung stromdurchflossener Leiter nicht mit der Erregung neuer Wirbelringe gleichbedeutend sein, sondern die alten wandern ruhig mit. Die einmal erregten Wirbelringe sind mit dem stromdurchflossenen Leiter gleichsam mechanisch zusammengekuppelt und zwar derart innig, dass, wenn durch die Kräfte eines fremden, in die Nähe gebrachten Feldes Bewegungsantriebe auf die Wirbelringe ausgeübt werden, sie diesen nur nachgeben, wenn ihnen die Möglichkeit geboten ist, ihren Leiter mitzunehmen. In dieser Zusammengehörigkeit liegt die Ursache und Erklärung für die im Eingange des Abschnittes kenntlich

gemachte Thatsache, dass stromdurchflossene Leiter bewegungsversuchend aufeinander einwirken. Ist die leiterbewegende Möglichkeit nicht geboten, dann verbleiben die Wirbelringe zwar an ihrem Orte, ändern aber in Folge des durch die Nähe des fremden Feldes gestörten Kräftegleichgewichtes ihre Form derart, dass sich ein Gleichgewichtszustand mit dem fremden Felde herausbilden kann. Dadurch entsteht ein vollkommen neues Feld, dessen Kraftlinienanordnung von dem der Einzelfelder wesentlich abweicht und von ihrer Gestalt und Lage abhängig ist. Fig. 16, 17 und 18 illustriren dieses Bestreben der Bildung neuartiger Felder in vorzüglicher Weise. Die Ursachen ihres jeweiligen Formzustandes liegen jetzt ausreichend klar zu Tage, sie sollen im Folgenden eine kurze Kennzeichnung erfahren.

In Fig. 16 liegen zwischen den Leitern gleichgerichtete Kraftlinienteile. Die Druckspannungen der ihnen zugehörigen Wirbel äussern ein gegenseitiges Wegdrängungsbestreben, welches aus den konzentrischen Kreiskraftlinien die einseitig verschobenen, kreisähnlichen Kraftlinienkurven entstehen lässt und bei beweglichen Leitern die Veranlassung zum gegenseitigen Entfernen wird. Die Zugspannungen kommen bei dieser Leiteranordnung als formändernde und bewegungsversuchende Kräfte nicht zur Geltung. — In Fig. 17 liegen zwischen den Leitern ungleichgerichtete Kraftlinienteile. Die ihnen entsprechenden Zug- und Druckspannungen heben sich zum Teil auf, zum Teil schwächen sie sich blos. Ein nennenswertes Gruppirungsbestreben der Feilspähne und gegenseitiges Wegdrängen der Kraftlinien wird sich demnach zwischen den Leitern nicht bemerkbar machen. Die längs den beiden Breitseiten der Leiteranordnung vorhandenen Kraftlinienteile sind gleichgerichtet und fallen, namentlich in der Mittenzone der Leiter, teilweise zusammen. Die daselbst verstärkten Zugspannungen und der Mangel eines Feldes zwischen den Leitern, bewirken ein Heranziehen der äusseren, halbkreisförmigen Wirbelteile und ein scheinbares Ineinandergehen derjenigen an den Breitseiten, sodass ellipsenförmige Gebilde entstehen, welche durch die Druckspannungen eine Einbuchtung nach Innen erfahren. Die in der Mittenzone verstärkten Zugspannungen geben beweglichen Leitern die Veranlassung sich gegenseitig zu nähern.



Die die Feldgestalt bestimmenden Ursachen lassen sich in ähnlicher Weise auch bei den übrigen, noch auf Seite 62 dargestellten Leiterformen feststellen; doch sei diese Aufgabe dem Leser überlassen. Als Wegweiser diene ihm dabei die für jede Leiterform gültige Regel: Wo die Kraftlinien der einzelnen Leiterbestandteile sich gegenseitig seitlich darbieten, besteht für Kraftlinien und Leiterbestandteile das Bestreben, sich wegzudrängen; wo sie hingegen hintereinander liegen, scheinbar ineinander verschmelzen, das Bestreben sich zu nähern.

Insofern die Ströme in den Leiterringen und Spiralen in gewisser Beziehung ebenfalls, wenn auch nicht auf die ganze Querschnittsfläche ausgedehnte Elektrizitätswirbel verkörpern, lässt sich als Richtungsregel für Strom und Kraftlinie diejenige für Wirbel und Kraftlinie, sinngemäss umgeformt, verwenden. Sie lautet: Ein Auge, das der Ring- oder Spulenachse von der Seite aus entlang sieht, welche die Ströme in der Bewegungsrichtung eines Uhrzeigers fliessend zeigt, sieht gleichzeitig in die Richtung der Kraftlinien. (Siehe Fig. 18.) Zur Handhabung bei derartigen Leitergebilden ist diese Regel entschieden sehr bequem; sie hat deshalb auch allgemeine Verwendung gefunden.

Mit diesen Darlegungen ist der sachlichen Begründung von der hohen Bedeutung wirbelnder Elektrizität, dem Rahmen des Werkchens entsprechend, Genüge gethan. Sie zeigten, dass die in der Leiterumgebung beobachtbaren Erscheinungen durch die Wirkungen der Zug- und Druckspannungen veranlasst werden, und dass diese Kräfte als die Merkmale des Daseins von einstweilen noch im Verborgenen liegenden Wirbelbewegungen aufzufassen sind. Als Hülfsmittel von nicht zu unterschätzender Bedeutung für die Orientirung über die räumliche Lage der Kräfte und der Wirbelbewegungsrichtung wurden die Kraftlinien erkannt und eingeführt.

Im Weitern soll eine andere, nicht minder wichtige Seite der Feldeigenschaften, und zwar die quantitative, einer Betrachtung unterzogen werden. Im Sinne der Wirbellehre ist damit die Aufgabe gegeben, festzustellen, wie gross an den verschiedenen Feldstellen die Geschwindigkeit ist, mit der die Wirbel ihre Bewegung vollziehen. Zum Messen dieser Geschwindigkeit sind nur die Zug- oder Druckspannungen geeignete Maasse, obwohl

sich aus ihrer Festlegung für die eigentliche Wirbelbewegung doch nur schliesslich erkennen lässt, ob und um wieviel eine Geschwindigkeit anders geartet ist, wie die mit ihr zum Vergleich herangezogene. Insofern jedoch die Zug- und Druckspannungen die einzigen Ursachen jener Wirkungen sind, die eine praktische Verwertung gewährleisten, ist mit ihrer Ermittelung schon alles erreicht, was wünschenswert erscheint. Es ist durchweg üblich geworden, sich bei quantitativen Felduntersuchungen auf die Bestimmung der Zugspannung zu beschränken. Aus dieser, im Bedarfsfall die ihr entsprechende Druckspannung herauszuschälen, ist eine reine Rechenangelegenheit. In den meisten Fällen werden die verschiedenen Stellen eines elektrischen Feldes voneinander abweichende Zugspannungswerte aufweisen. Die genügende Kennenlernung seines Charakters wird demnach die Feststellung einer zulangenden Anzahl vergleichbarer Zugspannungswerte erfordern. Ein Wertmaasstab wird für die Grösse der Zugspannungen zu gewinnen sein, wenn diese auf ein bestimmtes Feld einwirken können, das für alle Messungen von gleicher Beschaffenheit sein muss und das die Zugspannungen zur irgendwie messbaren Geltung kommen lässt. Ausserdem möchte ein solches Feld, im Interesse einer genauen Anortbringung, noch so geartet sein, dass es aus einer punktförmigen Quelle hervorgeht. Dieses Messfeld lässt sich, wie später gezeigt wird, thatsächlich herstellen, und zwar gehen seine Kraftlinien in angenähert radialer Richtung und in ungefähr gleicher Dichte nach allen Seiten von der punktförmigen Quelle aus. Dass es einen Bewegungsantrieb in der Kraftlinienrichtung erfahren muss, zeigt die nebenstehende Fig. 25. Die in der Richtung AC sich erstreckenden Wirbel des Messfeldes und die mit ihnen zusammenfallenden des zu untersuchenden Feldes schwächen sich, infolge der entgegengesetzten Bewegungsrichtung, gegenseitig ihre Zugspannungen. Das Umgekehrte ist in der Richtung BD der Fall. Dort tritt ein gegenseitiges Verstärken der Zugspannungen auf. Das Bestreben der Wiederherstellung des ge-

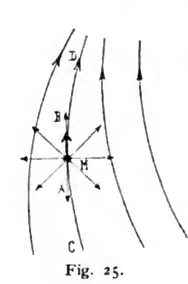


Fig. 25.

störten Kräftegleichgewichtes verursacht einen Bewegungsantrieb der punktförmigen Kraftlinien-Quelle an Orte mit verstärkten Zugspannungen, also in der Richtung BD. — Das punktförmige Messfeld hat aber nicht nur der Form nach, sondern auch hinsichtlich der Stärke seiner Zugspannungen von gleicher Beschaffenheit zu bleiben. Um allen Willkürlichkeiten aus dem Wege zu gehen, ist es üblich geworden, ein Messfeld von solcher Stärke anzuwenden, dass zwei solcher Felder, deren Punktquellen einen Abstand von 1 cm aufweisen, einen gegenseitigen Bewegungsantrieb von der Grösse einer Dyne[1]) äussern.

Wird nun ein diesen Recepten aufs genaueste entsprechendes Messfeld in ein zu untersuchendes Feld eingeführt, so erfährt es an den verschiedenen Stellen einen ensprechenden Bewegungsantrieb, dessen Grösse das Maass für die diesen Stellen zukommenden Zugspannungen darstellt. Diesem Maasse wurde die kennzeichnende Benennung elektrische Feldstärke beigelegt und

[1]) Gemäss dem in der Physik üblichen, sogenannten absoluten Maasssystem, ist eine Dyne die Einheit, mit welcher Kräfte gemessen werden. Das praktische Maasssystem hat das mgr, gr und kgr zur zahlenmässigen Festlegung von Kräften im Gebrauch. Im Vergleich mit diesen Einheiten, entspricht eine Dyne beinahe einem mgr; der Unterschied beträgt nur 1,9 %. Nachstehende Vergleichstabelle ist für die Zwecke der Umrechnung sehr nützlich.

1 Dyne	= 1,019 . . . . mgr	1 mgr =	0,981 Dynen
	= 0,001019 . . gr	1 gr =	981 „
	= 0,000001019 kgr	1 kgr =	981000 „

Dieses Nebeneinanderbestehen zweier verschiedener Kräftemaasssysteme ist nichts Vorteilhaftes. Es hätte erspart bleiben können, wenn bei der ursprünglichen Festlegung der Gramme-Einheit nicht so unpraktisch vorgegangen worden wäre. Bekanntlich ist unter einem Gramm diejenige Kraft zu verstehen, mit welcher die Erde in Meereshöhe und unter 45 ° Breite auf 1 cbcm Wasser von 4 ° C anziehend wirkt. Unter allen andern Breitegraden und in allen andern Höhen ist die Anziehung eine andere. In der Abhängigkeit von der geographischen Lage liegt die Hauptschwäche dieser Einheitsfestlegung. Das absolute Maasssystem hat sich davon frei zu erhalten gewusst, indem es die Krafteinheit, die Dyne, als eine Kraftgrösse auffasst, die auf das cbcm Wasser von 4° C eine Beschleunigung von 1 cm hervorbringt. So wünschenswert und zweckmässig eine Ausmerzung der bisherigen praktischen Kräfteeinheiten auch ist, so enthält sie doch noch nicht soviel Vorteile, dass die wirtschaftlichen Rücksichten hintenan gesetzt werden können. Der Umstand, dass bei Gebieten wie das vorliegende, die experimentell ermittelten und sich dem Gedächtniss einprägenden Zahlenwerte ihren Ausdruck in Dynen finden, verlangt auch für die hier gebotenen Darlegungen eine Mitaufnahme dieser Kräfteeinheit.

ist dieselbe, ihrer Natur als Kraftmaass entsprechend, mit den bei Kräften üblichen Maasseinheiten, hier speziell der Dyne, rechnerisch zu handhaben. Wird von einem Felde behauptet, dass seine Stärke an einer bestimmten Stelle 3000 Dynen entspricht, so besagt das demnach, dass das an diese Stelle gebrachte Messfeld einen Bewegungsantrieb von dieser Anzahl Krafteinheiten erfährt. Tritt die elektrische Feldstärke in mathematischen Gesetzesdarstellungen und deren rechnerischen Anwendungen auf, so empfiehlt sich die Einführung einer abkürzenden Bezeichnung. Üblich ist als solche der Buchstabe $\mathfrak{H}$.

Diese hier geschilderte Methode, sich über die quantitativen Verhältnisse eines elektrischen Feldes Rechenschaft abzulegen, hat seine Schwächen. Die auffälligste ist wohl die, dass mit der »elektrischen Feldstärke« kein Maass für die Zugspannung des zu untersuchenden Feldes, sondern für das durch das Hereinbringen des Messfeldes entstehende vereinigte Feld geschaffen ist. Insofern dieser Messfeldzusatz bei den starken Feldern der elektrotechnischen Praxis nur gering zu veranschlagen ist, kann sein Einfluss auf die Feldstärke für diese Fälle vernachlässigt werden. Immerhin wäre eine Ummodelung des Feldstärkebegriffes auf der Basis der der Praxis angehörenden Feldstärke-Messmethoden, welche mit der Anwendung eines Messfeldes nichts gemein haben, im Interesse einer rationellen Lehre wünschenswert.

Bisher sind die Kraftlinien als ein Hülfsmittel zur Orientirung über die räumliche Lage der Kräfte und der Wirbelbewegungsrichtung erkannt worden. Nun ist der Gedanke naheliegend, die Verwendung der Kraftlinien dadurch noch etwas vielseitiger zu gestalten, dass diesen die Möglichkeit, von verschiedener Stärke sein zu können, beigelegt wird; welche Stärke alsdann als Maass der Feldstärke zu gelten hat. Die Kraftlinie von der Stärke Eins, die Einheitslinie, wird hiebei am zweckmässigsten der Krafteinheit, der Dyne, als gleichwertig betrachtet, sodass z. B. eine Feldstärke von 6000 Einheitslinien soviel zu bedeuten hat, wie eine Feldstärke von 6000 Dynen. Ein besonderer praktischer Vorteil ist mit einer derartigen Vergrösserung des Kraftliniennutzens nicht zu gewinnen; der Charakter der Kraftlinie, wie er sich durch die Wirbellehre herausgestaltet hat, erfährt damit eher eine unerquickliche Verzerrung. Es darf daher

die Möglichkeit einer vielseitigeren Gestaltung mit dieser Andeutung ihr Bewenden haben. Immerhin hat eine derartige Anschauungsweise immer noch etwas mehr Daseinsberechtigung, als diejenige, welche von Schule und Praxis, aus Respektsgefühl vor den Thaten eines grossen Elektrikers, in Gestalt der Quadratcentimetermumie sorgfältigst konservirt wird. Es ist hier nicht der Ort, auf die Unklarheiten und Geschraubtheiten hinzuweisen, welche das Gefolge dieser antiken Bereicherung bilden. Nur soviel sei dem Leser mitgeteilt, dass hienach die Feldstärke nicht so gemessen wird, dass die Einheitslinien wenigstens wie oben noch gleichsam ineinander geschachtelt bleiben, sondern die Einheitslinien werden auseinander gerissen und fein säuberlich auf einen Quadratcentimeter Querschnittsfläche verteilt, um somit der Feldstärke die Gelegenheit zu geben, sich in folgender Form einzuführen: Ich bin diejenige Anzahl Einheitslinien, welche an derjenigen Stelle, wo ich gemessen werden soll, die Flächeneinheit qcm senkrecht durchstösst. Es könnte somit den Anschein gewinnen, als ob in einem Felde pro 1 qcm durchstossener Fläche, in Summa Summarum keine grössere Feldstärke, als die durch dieses Maass gegebene, vorhanden wäre; während doch die thatsächlich vorhandene, auf den Querschnitt ausgedehnte gesammte Feldstärke sicherlich ein den Feldstärken der noch übrigen auf den Querschnitt entfallenden Wirbel entsprechendes Plus aufweisen wird.

Die Dyne wird nach allem dem das folgerichtigste Maassmittel für die quantitativen Verhältnisse eines Feldes sein und bleiben.

Mit diesem Hülfsmittel sollen jetzt jene Gesetze dargelegt werden, welche aus der Leiteranordnung, der Stromstärke und der Lage der zu messenden Stelle eine rein rechnerische Ermittelung der daselbst vorhandenen elektrischen Feldstärke gestatten. Diese Gesetze enthalten ohne Zweifel etwas praktisch sehr Wertvolles; sie gestatten im voraus darüber zu bestimmen, wie ein stromdurchflossenes Leitergebilde beschaffen sein muss, um eine verlangte Feldstärke zu erzielen.

Die einleitenden Betrachtungen knüpfen sich an die Fig. 23 und die ihr zugegebenen Erläuterungen. Es wurde als die Ursache der ringförmigen Wirbelbildungen der zahnstangenartig wirkende Strom hingestellt. Diese Annahme ergibt zunächst die

Folgerung, dass die Wirbelbildungen überall da auftreten werden, wo sich die Zahnstangenwirkung geltend macht; das ist aber augenscheinlich auf der ganzen Länge der Strombahn. Jedes Teilchen der Strombahn wird mit seinem Strombetrage an jeder Feldstelle einen Impuls zum Wirbeln ausüben, welcher in quantitativer Hinsicht, je nach dem Abstand von Feldstelle und Teilchen, sehr verschieden gewertet sein wird. Die Gesammtwirkung aller Teilchen an einer bestimmten Feldstelle wird den Maassstab für die Grösse der daselbst vorhandenen Feldstärke abgeben. Auf den ersten Anblick gewinnt der rechnungsmässige Zusammenbau dieser Gesammtwirkung ein so unentwirrbares Aussehen, dass die Möglichkeit einer Vorausbestimmung der die Feldstärke ausmachenden Einflüsse sehr zweifelhaft wird. Umso angenehmer berührt die Thatsache, dass die Franzosen Biot und Savart schon in den zwanziger Jahren an einem sehr langen geradlinigen Leiter experimentell nachgewiesen haben, dass, wenigstens bei dieser Leiteranordnung, eine höchst einfache, gesetzmässige Beziehung für die Gesammtwirkung der Teilchen besteht und zwar eine Beziehung zwischen dem Abstand einer beliebigen Feldstelle vom Leiter und deren Feldstärke und von der Form: Die Feldstärke nimmt in demselben Verhältnisse ab, in welchem die Entfernung vom Leiter zunimmt. Dieses Gesetz hat in dem, bereits auf Seite 61 kenntlich gemachten, verschiedenen Gruppirungsbestreben der Eisenfeilspähne eine Bestätigung zu verzeichnen und gewinnt in Vereinigung mit dem noch frühzeitiger erkannten, weitern Gesetze — dass die Feldstärke an ein und derselben Stelle in dem Maasse wächst, in welchem die Leiterstromstärke zunimmt — eine alle feldstärkebestimmenden Einflüsse erschöpfende Gestalt. Die mathematische Formgebung dieser experimentellen Errungenschaften wird dem offenbar vervielfachenden Einfluss der Stromstärke und dem teilenden des Abstandes durch einen Bruch von der Form $\frac{S}{l}$ (l ist die abgekürzte Bezeichnung für den Abstand) Rechnung tragen. Mit diesem Bruch ist die bei 1 A Stromstärke und in 1 cm Abstand vorhandene Feldstärke zu vervielfachen, um die bei der beliebigen Stromstärke S in dem beliebigen Abstande l vorhandene Feldstärke zu erhalten.

Die Einheitenfeldstärke ergibt sowohl die Messung, als auch die mathematische Entwickelung zu 0,2 Dynen. Die für die Feldstärke eines sehr langen, geradlinigen Leiters gültige Gleichsetzung ist mithin

$$\mathfrak{H} = 0{,}2 \frac{S}{l} \text{ Dynen.}$$

Die bei einer Stromstärke von 10 A in einem Abstand von 2 cm vorhandene Feldstärke ermittelt sich beispielsweise aus dieser Gleichsetzung zu $0{,}2 \frac{10}{2} = 1$ Dyne.

Es war wiederum ein Franzose, namens Laplace, welcher aus dieser einem sehr langen Leiter zugehörenden Gleichsetzung eine Abart herausrechnete, die eine Feldstärkeermittelung für den Fall gestattete, dass dieser lange Leiter zu einem solchen von ausserordentlicher Kleinheit zusammenschrumpfte und alle möglichen Lagen und Entfernungen zu der Messstelle annahm. Da ein beliebig geformter Leiter aus verschieden geneigten Leitern en miniature zusammengesetzt gedacht werden kann, so ergibt die Laplace'sche Erweiterung des Biot-Savart'schen Gesetzes die Möglichkeit, auch für solche Leiter, durch Summirung der Einzelwirkungen, die Feldstärke rechnungsmässig festzulegen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Rechnung nur solange verhältnissmässig einfach gestaltet bleibt, wie das Messfeld symetrisch zu dem Leiter liegt.

Wird der geradlinige Leiter zu einem kreisförmigen gebogen und das Messfeld in den Mittelpunkt der Querschnittsfläche gebracht (Siehe Fig. 18), dann rücken die einzelnen Leiterteilchen durch das Biegen durchweg näher an dasselbe heran und zwar jedes bis zu dem mit dem Ringleiterradius gleichwertigen Abstand l. Die gesammte Feldstärke erfährt dadurch ohne Zweifel eine Vergrösserung. Messung und Rechnung zeigen, dass die Gleichsetzung im Allgemeinen bestehen bleibt; nur zeigt sich der Unterschied, dass die von 1 A bei 1 cm Leiterradius erzeugte Feldstärke nicht 0,2, sondern $0{,}2 \times 3{,}14$ Dynen beträgt. Für Kreisleiter und im Querschnittsmittelpunkte befindliche Messfelder gilt demnach die Gleichsetzung

$$\mathfrak{H} = 0{,}2 \times 3{,}14 \frac{S}{l} \text{ Dynen.}$$



Dadurch, dass das Messfeld an eine andere Querschnittsstelle gebracht wird, ändert sich sofort die Feldstärke und zwar wird sie um so grösser, je mehr das Messfeld an den Ring herantritt. Eine rechnungsmässige Verfolgung dieser Feldstärkevergrösserung ist ausserordentlich schwierig. Verhältnismässig einfacher Natur ist die mathematische Gleichsetzung nur noch für den Fall, dass das Messfeld eine Verschiebung längs der Achse AB erfährt (Siehe Fig. 18).

Von besonderer Wichtigkeit ist die Ermittelung der Feldstärke-Gleichsetzung einer geradachsigen Leiterspirale, wie sie z. B. Fig. 20 darstellt. Unter der Voraussetzung, dass sich das Messfeld in der Mitte der Spule befindet, und dass die gesammte Spiralenlänge l (Siehe die schematische Fig. 26) im Verhältniss zum Spiralendurchmesser gross ist, ergeben Rechnung und Messung die bemerkenswerte Thatsache, dass sich die Spiralenwirkung durch diejenige eines Leiterrings vollkommen ersetzen lässt, dessen Radius gleich der halben Spiralenlänge und dessen Stromstärke gleich der mit der Windungsanzahl vervielfachten Spiralenstromstärke ist. Wird die Windungsanzahl abgekürzt mit dem Buchstaben z bezeichnet, dann

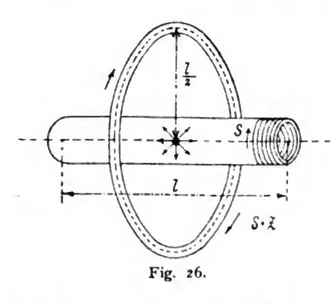


Fig. 26.

lässt sich ohne Weiteres für die in der Spulenmitte vorhandene Feldstärke die entsprechend angepasste Ringgleichsetzung anwenden:

$$\mathfrak{H} = 0{,}2 \times 3{,}14 \times \frac{S \times z}{\frac{l}{2}} = 1{,}257 \frac{S \times z}{l} \text{ Dynen.}$$

Die in dieser Gleichsetzung klar erkenntliche Möglichkeit, den vervielfachenden Einfluss der Stromstärke durch den der Windungszahl vermehren oder teilweise ersetzen zu können, ist der Praxis bei dem Bau felderzeugender Einrichtungen sehr zustatten gekommen. Sie hat sehr bald in der Spirale eine Leiteranordnung erkannt, welche sich, wie keine zweite, nur Hervorbringung

starker elektrischer Felder und zwar auch ohne Aufwand übermässiger Stromstärken, eignet. Unter diesen Umständen ist es völlig begreiflich, wenn der Mann vom Fach den doppelten vervielfachenden Einfluss in einen zusammenrafft und diesen durch die Anzahl der »Ampèrewindungen« misst. Des weitern ist aus der Gleichsetzung herauszulesen, dass an der Spirale, im Gegensatz zum Ringleiter, der Einfluss des Radius der einzelnen Windung vollkommen verschwindet. Streng genommen gilt dies allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die Spiralenlänge auch dann noch gross zum Durchmesser bleibt, wenn diesem die für den jeweiligen Behandlungsfall weitgehendste Vergrösserung zugeteilt wird. Sobald die Spirale den »langen« Charakter verliert, macht sich der Einfluss der einzelnen Windung geltend; es ist dann nicht mehr gleichgültig, ob die Spirale einen kleinen oder grossen Querschnitt besitzt; die Feldstärke wird in der Gleichsetzung den Querschnittseinfluss durch entsprechende Erweiterung berücksichtigt finden. In Bezug auf die Feldstärke anderer, innerhalb oder ausserhalb der Spirale gelegenen Stellen ist sinngemäss dasselbe, was beim Kreisleiter Erwähnung fand, auszuführen. Ergänzend wäre noch etwa einzuschalten, dass die den einzelnen Kraftlinien angehörenden Feldstärken einen um so kleineren Wert aufweisen, je mehr sie von dem Mittenquerschnitt der Spirale abliegen.

Durch das Umbiegen der geradachsigen Spirale zu dem in der Figur 21 dargestellten Leiterring, erfährt die für die Spiralenmitte geltende mathematische Formel keine Veränderung. Sie gilt demnach für beide Leitergebilde. Während sie aber bei der geradachsigen Spirale, genau genommen, nur auf die Mitte anwendbar ist, hat sie bei dem Leiterring, wie die Überlegung, Rechnung und Messung zeigen, für jede Stelle im Innern Daseinsberechtigung. Die in der mathematischen Formel auftretende Grösse l, welche bei der geradachsigen Spirale lediglich die Spiralenlänge darstellte, ist bei dem Ring von vielseitigerer Bedeutung. Wie das auf Seite 64 charakterisirte Gruppirungsbestreben der Feilspähne erwies, sind die Kraftlinien auf das Ringinnere beschränkt und zwar in Form von konzentrisch zur Ringachse liegenden Kreisen. Das lässt aber sofort durchblicken, dass die Länge der Spiralenachse durch die Länge

der mittleren Kraftlinie vollständig ersetzt werden kann, und dass im Allgemeinen die Länge l die Länge derjenigen Kraftlinie zu bedeuten hat, welche durch die jeweilige Feldstelle hindurchgeht. So entspricht z. B. in der Fig. 27 der Feldstärke an der Stelle 1 die Länge l_1, an der Stelle 2 die Länge l_2, und an der Stelle 3 die Länge l_3. Diejenigen Feldstellen, welche ein und derselben Kraftlinie angehören, haben in der ihre Stärke darstellenden Gleichsetzung dieselbe Länge aufzuweisen; sie sind demnach von quantitativ gleichem Werte. Das Gesetz von der Verwendbarkeit obiger mathematischer Formel an jeder Feldstelle erhält somit die nicht minder wichtige Erweiterung, dass längs einer Kraftlinie die Feldstärke von gleicher Grösse bleibt. Diese überaus einfache Gestaltung der Feldstärke im Innern des Ringes ermöglicht auf einfache Weise einen Maassstab für die gesammte in der Ringquerschnittsfläche vorhandene Feldstärke zu gewinnen. An sich ist das Problem, die Feldstärke der ganzen Querschnittsfläche zu ermitteln, einfacher Natur. Soviel Elektrizitätswirbel die Fläche durchsetzen, soviel Feldstärken sind zusammenzuzählen, um die gesammte Feldstärke zu erhalten. Insofern jedoch die Lösung des Problems die voraufgehende Ermittelung einer sicherlich sehr grossen Anzahl Feldstärken beansprucht, wird es in dieser Form praktisch zur Unmöglichkeit. Aus dieser Verlegenheit hilft in annehmbarer Weise die oben charakterisirte Gestaltung der Feldstärke im Ringinnern. Feldstellen am innern Ringrande werden, wegen der verhältnissmässig kleinen Kraftlinienlänge, eine grosse Stärke aufweisen. Diese wird eine Abnahme zu verzeichnen haben, je mehr die Feldstellen nach dem äussern Ringrande zu liegen, da dort die Kraftlinienlängen einen grösseren Wert besitzen (So ist z. B. in der Fig. 27 l_2 grösser als l_1, und l_3 grösser als l_2). Die Abnahme muss stetig sein, weil die Zunahme der Kraftlinienlänge eine stetige ist. Aus allem dem geht für die verschiedenen Feldstärken der Querschnittsfläche hervor, dass sie

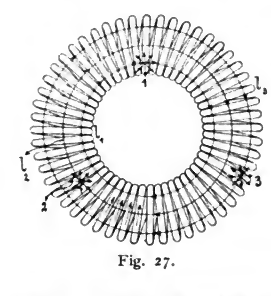


Fig. 27.

innen grosse, aussen kleine, und in der Mitte mittlere Werte besitzen müssen, welche in Folge der Stetigkeit — und das ist der Kernpunkt der Betrachtung — einen Gesammtwert ergeben, der offenbar auch erhältlich ist, wenn man die in der Mitte der Fläche vorhandene Feldstärke mit der Kraftlinienanzahl vervielfacht. Die Ermittelung der sehr grossen Anzahl Feldstärken verringert sich dadurch auf die leicht zu ermöglichende der mittleren Feldstärke. Damit ist aber immer noch nichts praktisch Verwertbares geschaffen; die Schwierigkeit liegt jetzt in der Angabe der Kraftlinienanzahl. Unter Berücksichtigung der Erkenntniss, dass diese Anzahl in innigem, zahlenmässigen Verhältniss zur Grösse der Querschnittsfläche stehen muss, indem jede Anzahländerung eine gleichwertige Flächenänderung bedingt, wird auch diese Schwierigkeit ihre Behebung erfahren. Eine Vervielfachung der Mittenfeldstärke mit der Querschnittsfläche ergibt den Maasstab zum Messen der gesammten in der Ringquerschnittsfläche vorhandenen Feldstärke. Wird, zur Vermeidung von Verwechslungen der Feldstärke $\mathfrak{H}$ mit der auf einen Querschnitt sich beziehenden gesammten Feldstärke, diese als Querschnittsfeldstärke bezeichnet, ferner die in qcm anzugebende Querschnittsfläche mit dem Buchstaben q abgekürzt, dann ist das an die einfache Gestaltung der Feldstärke im Ringinnern sich knüpfende Endresultat, die Gleichsetzung:

Elektrische Querschnittsfeldstärke $= \mathfrak{H} \times q$ Dynqcm.

Dieses Maass hat, wie dem aufmerksamen Leser nicht entgangen sein wird, in der Eigenschaft als Bestimmungsmittel der quantitativen Feldverhältnisse von Querschnitten, seine erheblichen Schwächen. Es gestattet nur die Festlegung, über welche Fläche sich die Mittenfeldstärke ausbreitet, nicht aber die gewünschte, wie gross die Gesammtsumme der Einzelfeldstärken ist. Leider ist etwas Besseres, bei dem augenblicklichen Kenntnissstand, nicht zu schaffen; das wäre nur möglich, wenn die Breitenausdehnung der einzelnen Elektrizitätswirbel bestimmt werden könnte.

An die Querschnittsfeldstärke knüpft sich ein wichtiges und praktisch vielseitig verwertbares Erhaltungsgesetz, das seinen Ursprung der auf Seite 67 ursächlich hervorgehobenen, verschiedenen Gestaltung der Wirbelgeschwindigkeit zu verdanken

hat, im übrigen aber eine davon völlig abweichende Form besitzt. Dieses Gesetz besagt in Bezug auf den Leiterring der Fig. 27, dass die Querschnittsfeldstärke in dem ganzen Ring von derselben Grösse bleibt. Dieselbe Anzahl Dynqcm wird demnach auf die verschiedenen Ringquerschnittsflächen entfallen. Die Erhaltung der Querschnittsfeldstärke ist aber auch dann noch vorhanden, wenn der Ring seine Kreisform aufgibt und die Ringachse irgend eine andere Gestalt annimmt; oder auch, wenn der Querschnitt der einzelnen Windung ebenfalls die Kreisform, zu Gunsten eines andern geometrischen Gebildes, verlässt. Das Erhaltungsgesetz dehnt sich aber noch weiter aus; die Querschnitte können an den einzelnen Ringstellen von verschiedener Grösse sein; $\mathfrak{H} \times q$ erfährt dadurch keine Änderung. Allerdings geht in diesem Falle das den Ringen von gleichem Querschnitt anhaftende Gleichbleiben der Feldstärke längs einer Kraftlinie verloren. Die Vergrösserung des Querschnitts ist mit einer entsprechenden Verkleinerung der Feldstärke verbunden; oder, um es naturgemässer auszudrücken, die grössere Elektrizitätsmasse kann bei demselben Bewegungsimpuls nur mit geringerer Geschwindigkeit wirbeln. Das Erhaltungsgesetz der Querschnittsfeldstärke wurde für die Technik der Ausgangspunkt einer für den Bau elektrischer Maschinen höchst wichtigen theoretischen Anschauungsweise, die im Nachfolgenden, an der geeigneten Stelle, Berücksichtigung erfahren wird.

Mit der somit erfolgten Aufstellung der feldstärkebestimmenden Gesetze praktisch wertvoller Leiterformen, ist des Weitern die Möglichkeit gewonnen, sich rechnerisch über die erzielbaren Feldstärken zu orientiren. Diese sind von mässiger Grösse und lassen sich mit den der Elektrotechnik verfügbaren in keinen Einklang bringen. Eine Spirale, welche in ihrem Innern eine Feldstärke von 200—300 Dynen erzeugt, hat damit eine recht respektable Leistung vollbracht. Diejenigen maschinellen Einrichtungen der Industrie, deren Hauptbestandteil in einem Felde besteht, weisen hingegen Feldstärken von 10000 und noch mehr Dynen auf. Das sind Widersprüche, die so lange bestehen bleiben, als nicht von einer überaus wichtigen Thatsache Kenntniss genommen wird. Es gibt nämlich eine Anzahl Stoffe, welche, wenn sie in ein elektrisches Feld gebracht werden, in weitem Umkreise und am meisten in dem

von den Stoffen selbst eingenommenen Raume, die vorhandene elektrische Feldstärke vergrössern und zwar manchmal in erstaunlichem Maasse. Derjenige Stoff, bei dem diese Eigenschaft am auffälligsten zu Tage tritt, ist das Eisen. So wird weiches, in eine Drahtspirale eingeschobenes Schmiedeeisen die durch den Strom erzeugte Feldstärke unter Umständen auf das 3000-fache hinaufschrauben. Ohne Zweifel liegt die Ursache dieser feldstärkevermehrenden Eigenschaft des Eisens in diesem selbst. Um ein klares Bild von den stattfindenden Vorgängen zu erlangen, ist die Aufstellung einer Annahme erforderlich, deren Richtigkeit zwar bis heute noch nicht erwiesen ist, die aber ebensoviel Wahrscheinlichkeit in sich birgt, wie die Annahme, dass sich in dem elektrischen Felde Elektrizität in Wirbelbewegung befindet. Die richtige Anwendung dieser Annahme gestattet gewissermaassen ein Vorhersagen alles dessen, was als Folge dieser merkwürdigen Eigenschaft an Erscheinungen zu erwarten ist und was sich durch das Experiment erhärten lässt.

Bekanntlich stellt sich der Physiker die Materie als aus ausserordentlich vielen und ausserordentlich kleinen, mechanisch nicht mehr weiter zerlegbaren Teilchen zusammengesetzt vor, denen er den Namen Moleküle beilegt. Die Erforschung der Eigenschaften dieser Moleküle ist eine der Hauptaufgaben der modernen Naturwissenschaft. Es ist alle Ursache vorhanden, dem Molekül als eine seiner wichtigsten Eigenschaften die Widerstandslosigkeit gegen im Innern fliessende Elektrizität anzurechnen. Wenn aber einer Bewegung nichts Hemmendes in den Weg tritt, hört sie auch nie auf; ein Elektrizitätswirbel, der in dem Molekül kreist, wird demnach in unveränderlicher Stärke und bis in alle Ewigkeit fortkreisen.

Alle im Weltall vorhandenen Stoffe sind in ihren Molekülen mit derartigen Elektrizitätswirbeln ausgestattet anzusehen. Die Menge und die Geschwindigkeit dieser Wirbel ist für jeden Stoff eine andere und zwar ist sie bei den meisten Stoffen (so namentlich auch bei der Luft) derart gering, dass lediglich durch Anwendung sehr empfindlicher Hülfsmittel eine Wahrnehmung möglich ist. Nur bei ganz wenigen Stoffen, wie Kobalt, Nickel und vor allem Eisen, sind die Wirbel quantitativ sehr stark ausgeprägt.

Indem die Moleküle eines Stoffes mit derartigen Wirbeln ausgerüstet werden, erhalten sie gleichzeitig ein Stückchen Kraftlinie mit der daran angreifenden Zug- und Druckspannung und von einer Richtung, wie sie sich aus der auf Seite 68 aufgestellten Gedächtnisregel ergibt. Ein als Kügelchen geformt gedachtes Molekül wird sich, mit den Wirbelattributen versehen, etwa in der in Fig. 28 skizzirten Weise verbildlichen lassen. Der molekulare Bau der Materie wurde von den Physikern auch benutzt, um die unterscheidenden Eigenschaften zwischen flüssigen (einschliesslich gasförmigen) und festen Stoffen klarzulegen. In Flüssigkeiten haben die Moleküle vollkommen freie Beweglichkeit, in festen Stoffen aber nicht. Sie können sich in diesen wohl nur um eine festgelagerte und biegsame Achse drehen. Aber selbst diese Bewegung leitet sich nicht von selbst ein, sondern bedarf des Aufwandes eines gewissen Zwanges, der bei den verschiedenen Stoffen verschieden gewertet ist. In Schmiedeisen drehen sich z. B. die Moleküle, im Verhältniss zu denen in gehärtetem Stahl, sehr leicht. Die festgelagerte Achse des Moleküls einer starren Materie ist in der Fig. 28 durch die Gerade A B angedeutet.



Fig. 28.

Mit der Annahme des Molekülwirbels und der Drehung des Moleküls um eine Achse, ist soweit Alles geschaffen, um eine stichhaltende Erklärung der feldstärkevermehrenden Eigenschaft gewisser Stoffe zu geben. Es ist ein kunstvolles Gebäude, das sich die Naturwissenschaft darauf errichtet hat; die gediegensten Physiker haben ihre Kräfte daran bethätigt und wenn es auch noch manche unausgebaute Stelle aufweist, reicht doch schon das Vorhandene hin, um selbst anspruchsvolle Wünsche zu befriedigen.

Die Wirbel eines elektrischen Feldes üben auf die Moleküle einen Drehzwang aus und zwar versuchen sie die Drehung soweit zu treiben, dass die Kraftlinienstückchen gleichgerichtet und parallel zu den Feldkraftlinien werden. Durch das Zusammenlegen gleichgerichteter Kraftlinien wachsen aber die Wirbelmengen und somit auch die Feldstärken. Hierin liegt die Begründung der anundfürsich seltsamen Feldstärkevermehrung durch Eisen und andere Stoffe; sie ist einfacher Natur und einleuchtend. Eine

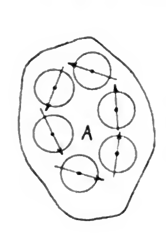


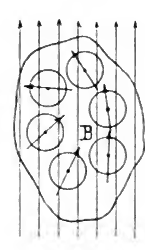
jede Materie mit gerichteten Molekülen und kräftigen Wirbeln in denselben bietet eine Menge wichtiger Erscheinungen dar, welche alle unter der Flagge Magnetismus kursiren. Im Anschluss an diesen Sammelbegriff haben noch eine Anzahl anderer Bezeichnungen Geltung erlangt. So wird z. B. das zwangsweise Drehen der Moleküle als magnetisiren bezeichnet. Die Kraftlinienstückchen der Moleküle sind magnetische Kraftlinien, und das sich aus ihnen bildende Feld ist ein magnetisches Feld, während das gesamte Feld den Namen elektromagnetisches Feld besitzt. Der Bewegungsantrieb, den das auf Seite 71 beschriebene Messfeld in einem rein magnetischen Felde erhält, werde, analog der elektrischen Feldstärke, als magnetische Feldstärke und der in dem elektromagnetischen Felde, als elektromagnetische Feldstärke bezeichnet. Für rechnerische Darlegungen sind diese Feldstärken durch die üblichen abkürzenden Buchstaben $\mathfrak{J}$ und $\mathfrak{B}$ zu ersetzen. Diejenigen Stoffe, die Wirbelströme in ihren Molekülen führen, heissen magnetische Stoffe und in dem Zustand des Magnetisirtseins, Magnete. Hiezu ist jedoch zu bemerken, dass, wenn auch, wie bereits erwähnt wurde, alle existirenden Stoffe eigentlich magnetische sind, doch nur der magnetisch hervorragendste, das Eisen, dieses Prädikat mit voller Berechtigung führt. Wo demnach im Nachfolgenden von magnetischen Stoffen gesprochen wird, ist speziell an Eisen und zwar an die 3 Formen Schmiedeisen, Gusseisen und Stahl zu denken.

Die atmosphärische Luft, in welcher bisher stillschweigend die elektrischen Felder dargestellt angenommen wurden, zeigt eine derart kleine Änderung des Feldzustandes gegenüber dem im leeren Raume, dass es völlig gleichgültig ist, ob sich die grundlegenden Entwicklungen an Luftfelder oder, wie es von Rechts wegen sein müsste, an Vakuumfelder anschliessen.

Weist eine magnetische Substanz durch keinerlei Erscheinungen darauf hin, dass ein Magnetisiren stattgefunden hat, so sind die Moleküle so gelagert zu denken, dass ihre Kraftlinienstückchen zahllose kleine und in der Substanz geschlossene Kreise bilden. Nach aussen werden solche Kreise naturgemäss wirkungslos bleiben. Die Figur 29 zeigt eine Molekülkette und zwar in 3 Zustandsformen, wie sie z. B. von einem in eine

Drahtspirale eingeschobenen Eisenkern zu erwarten sind. Form A ist die des geschlossenen Kreises; sie ist nur möglich, wenn kein magnetisirender Einfluss vorhanden ist. Wird aber ein solcher, z. B. in der Gestalt eines elektrischen Feldes, geschaffen, dann zerreisst der geschlossene Kreis, und die Moleküle werden gezwungen, sich mit ihren Kraftlinienstückchen nach Möglichkeit den elektrischen Kraftlinien anzupassen. Je vollkommener diese Anpassung vorsichgeht, umsomehr wird die Feldstärke eine Vergrösserung erfahren. Die Erfahrung zeigt, dass mit einer bestimmten elektrischen Feldstärke, also einer bestimmten Magnetisirungsursache, nicht jede beliebige, sondern ebenfalls eine **bestimmte** Feldvergrösserung eintritt, entsprechend einem bestimmten Magnetisirungsgrad der magnetischen Substanz. Soll dieser Grad noch mehr gesteigert werden, so ist dies nur durch eine entsprechende Vergrösserung der Spulenfeldstärke möglich.





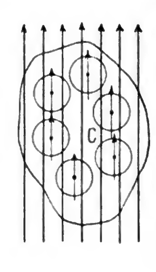


Fig. 29.

Form B zeigt die Magnetisirung der Substanz in einem Zwischenstadium; die elektrische Feldstärke ist noch nicht stark genug, die Magnetisirung zu dem der Form C entsprechenden Endstadium zu treiben. Diese letzte Form enthält die magnetischen und elektrischen Kraftlinien vollkommen parallellaufend; sie zeigt, dass damit der magnetisirende Einfluss der elektrischen Feldstärke sein Ende erreicht hat; eine weitere Steigerung bringt keine höhere Magnetisirung der Substanz mehr hervor, also auch keinen weitern Zusatz an magnetischem Feld. Diese theoretisch herausgelesene Folgerung stimmt ausgezeichnet mit der Erfahrung überein. Diese zeigt, dass sich von einem gewissen Stadium der Magnetisirung an, der Magnetisirungsgrad einer magnetischen Substanz mit der stetig fortwachsenden elektrischen

Feldstärke immer weniger und weniger vergrössert. In diesem Zustand wird die magnetische Substanz als sich ihrer Sättigung nähernd angesehen; die Erreichung der Sättigung selbst ist experimentell eine schwierige Angelegenheit.

Mit dem hier eingeschlagenen Weg, einen Einblick in das Gebiet des Magnetismus zu erlangen, wurde das traditionelle Lehrverfahren, welches zuerst die bekannten Erscheinungen und dann die möglichen Ursachen zu entwickeln pflegt, umgekehrt. So selbstverständlich eine solche Aufeinanderfolge bei Berücksichtigung des Werdeganges dieses Wissenszweiges ist, so wenig kann sie aber andrerseits dem Lernenden von Vorteil sein. Dieser wird die richtige Bedeutung und Wertschätzung der Erfahrungsergebnisse besser und leichter fassen, wenn er von vornherein mit den Urhebern vertraut ist. Zu der Abfassung einer rationellen Elektrizitätslehre gehört neben Diesem noch vieles Anderes; so auch die Empfindung, dass es nicht gut ist, Betrachtungen über elektrische Felder anderswohin, wie vor die über magnetische bezw. elektromagnetische Felder zu stellen.

Nachdem die Erkenntniss einmal erlangt war, dass magnetische Substanzen ein einfaches Mittel darbieten, elektrische Felder zu verstärken, war auch sofort das Bedürfniss entstanden, die quantitativen Beziehungen zwischen der elektrischen Feldstärke und der Magnetisirungsfähigkeit dieser Substanzen zu ermitteln. Aber alle Bemühungen auf rein rechnerischem Wege ein befriedigendes Beziehungsgesetz zwischen $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{J}$ oder $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B}$ aufzustellen, schlugen mehr oder weniger fehl. Es sind erst knapp 10 Jahre verflossen, seit sich die Ansicht praktisch Bahn gebrochen hat, dass der erforderliche Genauigkeitsgrad nur durch messende Untersuchungen jedes einzelnen dieser magnetischen Stoffe zu erlangen ist. Von diesem Zeitpunkt an ist es eine förmliche Modesache geworden, für alle möglichen Substanzen, namentlich aber für Eisen, den magnetischen Charakter festzulegen. Nicht wegzuleugnen ist, dass auf diese Weise die Technik mit Eisensorten bekannt wurde, die nach jeder Richtung alles leisten, was verlangt werden darf. Die meisten geschaffenen Untersuchungsmethoden gehen darauf hinaus, $\mathfrak{B}$ zu messen und $\mathfrak{H}$ mit Hülfe der der angewandten Leiterform entsprechenden Gleichsetzung

für $\mathfrak{H}$ zu berechnen. Mit der Kenntniss dieser beiden Werte ist alles andere, was etwa noch interessiren könnte, mitbestimmt, so namentlich auch die magnetische Feldstärke; denn diese ist doch ohne Zweifel durch den Rest ausgedrückt, der nach Abzug der elektrischen Feldstärke von der elektromagnetischen übrig bleibt und lässt sich demnach rechnerisch aus der Gleichsetzung

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{B} - \mathfrak{H}$$

ohne weiteres ermitteln. Eine Überlegung wird erkennen lassen, dass eigentlich weder $\mathfrak{J}$ noch $\mathfrak{B}$ die geeigneten Grössen sind, aus deren Kenntniss ein richtiger Maassstab für die Grösse der Nachgiebigkeit der Moleküle zu, durch einen Feldzwang von bestimmter Grösse, veranlassten Drehungen, gewonnen werden kann. Eine geeignete Grösse ist aber sofort geschaffen, wenn $\mathfrak{B}$ durch $\mathfrak{H}$ dividirt wird. Indem der entstehende Quotient besagt, um wieviel die elektromagnetische Feldstärke grösser als die elektrische ist, ist auch ein besserer Maassstab zur Verfügung gestellt. Es wird von demselben denn auch viel Gebrauch gemacht und führt er die Bezeichnung D u r c h l ä s s i g k e i t (manchmal auch die dasselbe besagende, fremdsprachliche Form Permeabilität). Sein mathematisches Gewand ist einfacher, es besteht in dem Buchstaben μ, dem griechischen m (Müh) und in der Gleichsetzung:

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}.$$

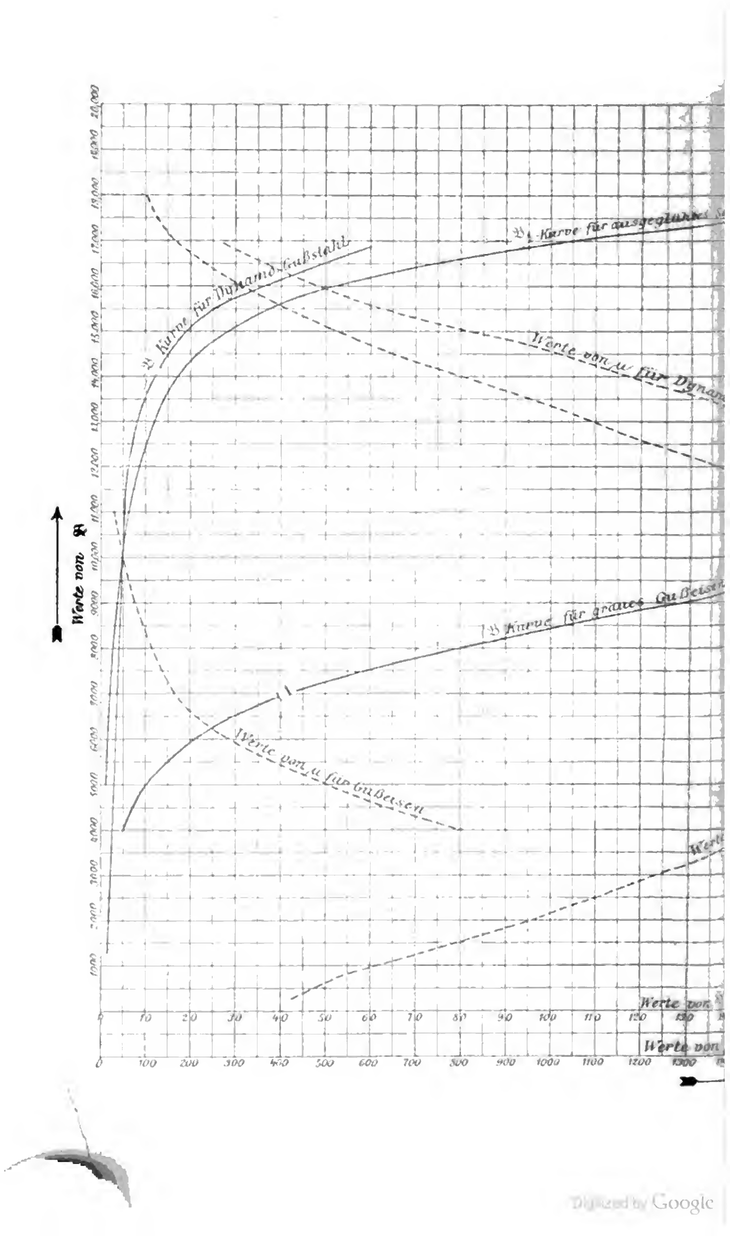
Die aus den Messungen der verschiedenen magnetischen Substanzen gewonnenen Zahlenwerte lassen sich am übersichtlichsten durch zeichnerische Darstellung vergleichen und beurteilen. Am meisten wird dieses Verfahren zur Vergleichung der $\mathfrak{H}$- und $\mathfrak{B}$-, sowie der μ- und $\mathfrak{B}$-Werte in Anwendung gebracht und zwar in der folgenden Weise:

Die Schenkel eines rechten Winkels werden in durchweg gleiche Teile eingeteilt, und jeder Teil einer passend gewählten Anzahl der in Frage kommenden Grössen als gleichwertig betrachtet. Nun werden, beim Scheitel mit Null anfangend, die Teilstriche fortlaufend beziffert und zwar auf dem Horizontalschenkel mit den $\mathfrak{H}$- und μ-Werten, auf dem Vertikalschenkel mit den $\mathfrak{B}$-Werten. Die Bezifferung wird soweit fortgesetzt,

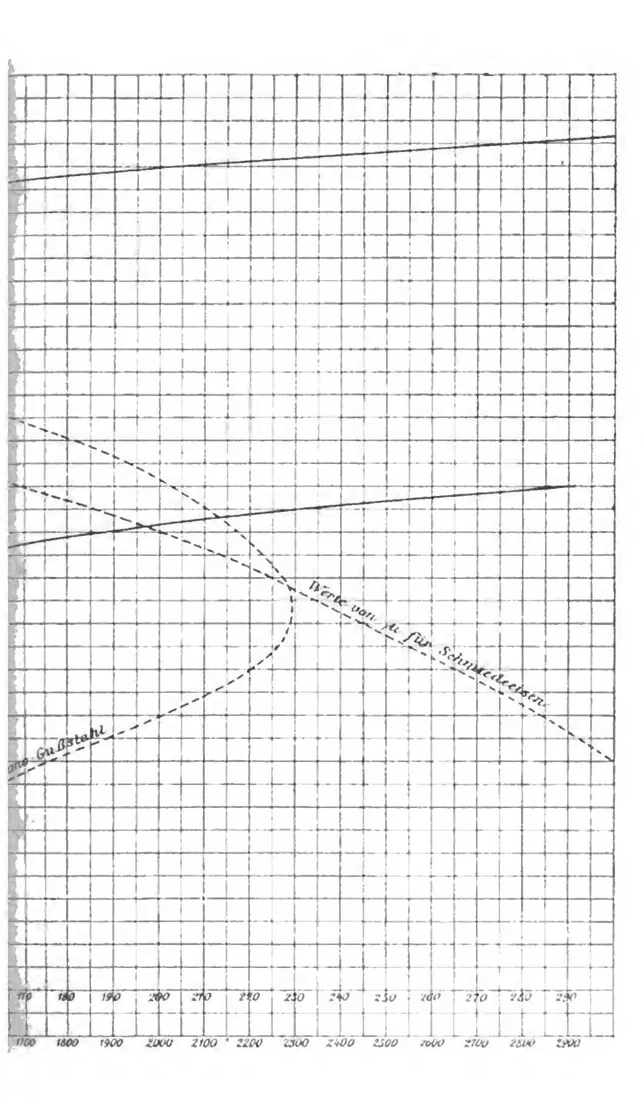
bis die grössten, noch interessirenden Zahlenbeträge erreicht sind. In den Teilpunkten werden alsdann zu den Schenkeln Senkrechte errichtet, und so ein in lauter Quadrate eingeteiltes Rechteck hergestellt. Ein solches Rechteck zeigt die vorstehende Tafel; auf seiner Fläche werden die eigentlichen zeichnerischen Darstellungen entworfen und zwar in der Weise, dass erst die jeweils zusammengehörenden Werte von $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B}$, bezw. μ und $\mathfrak{B}$ auf den Schenkeln zur Aufsuchung gelangen, und dass dann in den entsprechenden Punkten errichtete Senkrechte durch Verlängern innerhalb der Tafel zum Schneiden gebracht werden. Ein dergestalt erhaltener Schnittpunkt ist z. B. der Punkt A in der Tafel. Die ihn bestimmenden Zahlenwerte sind $\mathfrak{H} = 40$ und $\mathfrak{B} = 7000$. Sind alle Schnittpunkte ermittelt, dann werden dieselben durch eine Linie miteinander verbunden, welche, wenn nur richtige Werte ermittelt wurden, eine stetig verlaufende und charakteristisch geformte Kurve ergeben muss. Diese Kurve lässt eine vollkommen ausreichende Beurteilung der magnetischen Qualität des gemessenen Stoffes zu, bildet also die Lösung dessen, was auf rein rechnerischem Wege nicht zu erlangen war. Jeder Erschaffer elektrischer Maschinen, der dieselben vorausberechnen will, wird in erster Linie danach zu streben haben, für das von ihm zur Verwendung gebrachte Eisen die Qualitätskurven festzustellen. Die Tafel enthält derartige Kurven und zwar von einer bestimmten Sorte grauem Gusseisen, ausgeglühtem Schmiedeeisen und sogenanntem Dynamo-Gussstahl. Das anfänglich ausserordentlich steile Ansteigen der $\mathfrak{B}$-Kurven bringt zum Ausdruck, dass beim Beginn der Magnetisirung schon geringe $\mathfrak{H}$-Werte zur Erzielung starker elektromagnetischer Felder hinreichen — die Moleküle gehorchen bereits einem kleinen Zwange zum Einstellen in die feldstärkevermehrende Lage. Das daraufolgende knieartige Umbiegen der Kurve deutet auf eine Abnahme in der Geschwindigkeit des Wachstums der elektromagnetischen Felder. Hinter dem Knie ist der ansteigende Charakter der Kurve nur noch schwach ausgeprägt; das beweist, dass in dieser Magnetisirungsregion selbst geringe $\mathfrak{B}$-Vermehrungen nur durch Aufwand eines unverhältnissmässig grossen Plus an elektrischer Feldstärke zu erlangen sind — die Moleküle leisten einem weitern Einstellen nur bei Anwendung eines erheblich



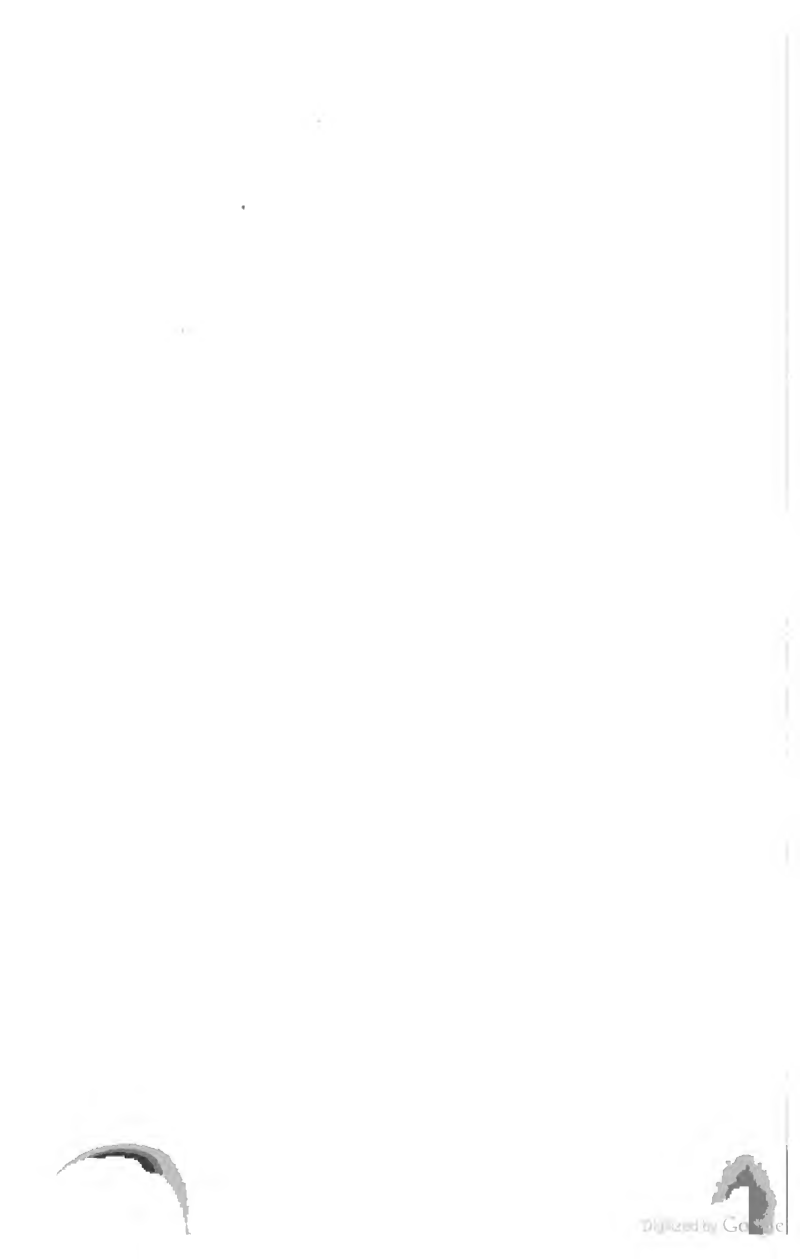




Werte von 𝔅
𝔅-Kurve für Dynamo-Gußstahl
𝔅-Kurve für ausgeglühtes
Werte von μ für Dynamo
𝔅-Kurve für graues Gußeisen
Werte von μ für Gußeisen
Werte von
Werte von



Werte von μ für Schmiedeeisen
Gußstahl
170
180
190
200
210
220
230
240
250
260
270
280
290
1700
1800
1900
2000
2100
2200
2300
2400
2500
2600
2700
2800
2900



grösser werdenden Zwanges Folge. Der Benutzungsbereich der 𝔅 - Kurven für die Zwecke der Praxis gehört aus technischen und wirtschaftlichen Gründen, fast ausschliesslich dem Knie an. Dasselbe umfasst die Magnetisirungsgrade von weder zu stabilem, noch zu labilem Charakter und wird, je nach der magnetischen Güte des Materiales, von dem horizontalen Winkelschenkel mehr oder weniger weit abliegen. Das Knie der Gussstahlkurve liegt in der Tafel am höchsten. Aus diesem Grunde und ausserdem wegen seiner leichten Formbarkeit durch Giessen, ist dieser magnetische Stoff für die Elektrotechnik besonders wertvoll geworden. Einer allgemeinen Einführung des Dynamogussstahles stand bisher der verhältnissmässig hohe Preis und die beschränkte Produktion im Wege; beide Nachteile sind jedoch durch die wachsende Konkurrenz immer mehr im Schwinden begriffen. Zur Erlernung der Handhabung von Kurventafeln ist dem Leser die Richtigkeitsprüfung der nachstehend zusammengestellten Zahlenwerte durch sinngemässes Aufsuchen in der Tafel zu empfehlen.

𝔅	Gusseisen		Schmiedeisen		Gussstahl	
	𝔅	μ	𝔅	μ	𝔅	μ
10	5000	500	12400	1240	13500	1350
30	6510	217	15090	503	15800	527
100	8500	85	16900	169	—	—
200	10200	51	18000	90	—	—

Mit diesen Betrachtungen ist der durch das elektrische Feld veranlasste Drehzwang auf die Moleküle in seinen praktischen Folgen ausreichend gewürdigt. Durch das teilweise oder gänzliche Aufheben des Drehzwanges, etwa hervorgebracht durch Abschwächung oder Unterbrechung des Stromes in einer Leiterspirale, bietet sich eine neue Seite dieses Erscheinungsgebietes dar, die ebenfalls das vollste Interesse in Anspruch nehmen darf. Bei voraufgegangenen Magnetisirungen, die an das Knie der Kurve oder über dasselbe hinausreichen, zeigt nämlich die Er-



fahrung, dass auch nach Wegnahme des elektrischen Feldes ein bestimmter Betrag des magnetischen Feldes bestehen bleibt. Die magnetische Substanz ist dauernd zum Magneten geworden. Im Rahmen der Molekülwirbel-Anschauung deutet dieses Bestehenbleiben des Magnetfeldes darauf hin, dass die Moleküle nach ausgeführter Drehung mehr oder weniger in der neuen Lage verharren und damit auch ihre Kraftlinienstückchen nach aussen wirksam erhalten. An Hülfsmitteln zur Rückwärtsdrehung der Moleküle in ihre ursprüngliche Lage, also zum Aufheben des Dauermagnetismus, fehlt es nicht; als solche sind namentlich mechanische Erschütterung, Erwärmung und entgegengesetzt gerichtete Felder bekannt. Die Menge, in welcher diese Mittel ihre Wirkung bethätigen müssen, ist je nach der Art des magnetischen Stoffes sehr verschieden gewertet. Zwischen ihr und der mechanischen Härte des Stoffes besteht eine ebenso einfache wie interessante Beziehung, die darin gipfelt, dass ein höherer Härtegrad der magnetischen Substanz eine grössere Anstrengung zum Drehen der Moleküle mitsichbringt. Weiches Schmiedeisen gehorcht in seinen Molekülen dem Drehzwang des elektrischen Feldes verhältnissmässig ausserordentlich leicht; ebenso leicht erfolgt die Rückwärtsdrehung, zu welcher schon ganz geringe Erschütterungen hinreichen. Am schlechtesten bequemt sich gehärteter Stahl zu molekularen Drehungen. Zu seiner Magnetisirung sind hohe elektrische Feldstärken erforderlich, dafür hält er aber das erlangte Magnetfeld mit ausserordentlicher Zähigkeit fest. Gehärteter Stahl ist demzufolge der geeignetste Stoff zur Herstellung von Dauermagneten.

Als Maassstab für die Grösse des Bestrebens, Magnetismus dauernd beizubehalten, kann diejenige Feldstärke eines entgegengesetzt gerichteten Feldes angesehen werden, die gerade ausreicht, um den Magnetismus einer magnetischen Substanz zu vernichten. Der Widerstand gegen Rückwärtsdrehungen von seiten der Moleküle hat zur Folge, dass eine dem Anwachsen der elektrischen Feldstärke entsprechende 𝔅-Kurve niemals mit einer solchen zusammenfallen kann, die aus der Abnahme der elektrischen Feldstärke hervorgeht. Stets wird die letztere Kurve in der Tafel höher liegen als die erstere und zwar dergestalt, dass härteren Substanzen im Allgemeinen ein entsprechend





grösserer gegenseitiger Kurvenabstand entspricht. Diese Thatsache führt eigentlich noch am klarsten vor das Auge, dass die Moleküle in ihren Drehbewegungen stets den quantitativen Änderungen eines elektrischen Feldes gleichsam hintennach hinken. Der Herr Professor Ewing aus England hatte daher im Allgemeinen nicht so ganz Unrecht, wenn er das in diese Richtung einschlagende Erscheinungsgebiet mit dem das Nachhinken umfassenden griechischen Wort Hysteresis belehnte. Da ein Drehen der Moleküle nur bei fortdauerndem Kraftaufwand vorsichgeht, so leisten diese während dieses Bewegungsstadiums Widerstandsarbeit. Die dieser Arbeit gleichwertige Energiemenge wird bei der Anwesenheit eines elektrischen Feldes dem dasselbe erzeugenden Strom entnommen; eine bestimmte Menge von dessen gesammten Watts sind demnach der Hysteresisarbeit zuzuwenden. Die durch den Hysteresisvorgang in mechanische Energie umgewandelte elektrische Energie ist als solche nach aussen nur schwer wahrnehmbar; indem sie sich aber sofort in Wärmeenergie umformt, tritt sie in Gestalt einer Temperaturerhöhung der magnetischen Substanz zu Tage. Für die Einrichtungen der Elektrotechnik kann die Wärmeproduktion nur dann von Belang werden, wenn diese verhältnissmässig grosse Eisenmassen enthalten, in denen nicht nur rasch aufeinanderfolgende, sondern auch längere Zeit anhaltende und möglichst weit getriebene Moleküldrehungen stattfinden. Die elektrischen Strom- und Krafterzeugungsmaschinen, namentlich aber die Wechselstromumformer, sind solche Einrichtungen, bei deren Bau mit der Wärmebildung durch Hysteresis gerechnet werden muss. Um die Wärmebildung, welche nicht nur einen Wattverlust, sondern auch eine schädliche Temperaturerhöhung im Gefolge hat, nach Möglichkeit unterdrücken zu können, ist in erster Linie die zwischen ihr und ihren Ursachen bestehende gesetzmässige Beziehung festzustellen. Schon eine kurze Überlegung wird alle die Einflüsse klarlegen, die an der gesammten Wärmeproduktion interessirt sind. Die Volumen-Menge der magnetischen Substanz, ihre Härte, die im Maximum erreichte elektromagnetische Feldstärke und die Schnelligkeit des Richtungswechsels der elektrischen Kraftlinien sind als solche erkennlich. Der Pseudoamerikaner C. P. Steinmetz hat im Jahre 1892 ein

experimentelles Erfahrungsgesetz zwischen der aufzuwendenden Anzahl Watts und diesen Grössen veröffentlicht, welches sich in der Form einer Gleichsetzung, wie folgt, darstellt:

$$\text{Wattverlust} = \text{Materialfaktor} \times \mathfrak{B}_{max}^{1,6} \times \text{Volumen} \times \text{Wechsel pro 1 Sek.} \times 10^{-7}$$

Zu dieser Gleichsetzung ist erläuternd zu bemerken, dass der Materialfaktor bei jeder magnetischen Substanz einem bestimmten, nur experimentell feststellbaren Zahlenwert, der den Einfluss der Härte insichbirgt, entspricht.[1] Das Volumen der magnetischen Substanz ist in ccm auszudrücken. Der Wechsel pro 1 Sekunde ist, speziell bei Wechselströmen, der Periodenzahl (Siehe Seite 18) gleichzusetzen. $\mathfrak{B}_{max}^{1,6}$ und 10^{-7} sind Potenzenformen, wovon die erste besagt, dass $\mathfrak{B}_{max}$ 1,6 mal mit sich selbst zu vervielfachen ist; hingegen die zweite, dass die gesammten Werte auf der rechten Seite noch durch 10 Millionen zu teilen sind.

Zahlenbeispiel. Aufgabe. Ein Wechselstromumformer besitze ein Eisengestell von 15000 ccm Volumen. Der Materialfaktor des Eisens sei 0,002, die maximale elektromagnetische Feldstärke = 5000 Dynen und die Periodenzahl des Wechselstromes = 50. Wie gross ist der Wattverbrauch?

Lösung. Setzt man diese Zahlenwerte in die Gleichsetzung ein, dann ist:

$$\text{Wattverlust} = \frac{0,002 \times 5000^{1,6} \times 15000 \times 50}{10000000} = 124,3$$

($5000^{1,6}$ ergibt das logarithmische Verfahren zu 828500).

[1]) Steinmetz ermittelte folgende Grenzwerte für die verschiedenen Eisensorten:

Schmiedeisen	0,002 — 0,0045
Weicher Stahl	0,008 — 0,012
Gusseisen	0,016
Harter Stahl	0,025 — 0,082



Nachdem so die Bekanntschaft mit den Ursachen und der quantitativen Äusserung der feldstärkevermehrenden Eigenschaft magnetischer Stoffe angeknüpft wurde, empfiehlt es sich, auch die Form einiger charakteristischer elektromagnetischer und magnetischer Felder, soweit sie überhaupt der Beobachtung zugänglich gemacht werden können, dem Versuche einer Erklärung zu unterziehen. Als experimentelle Hülfsmittel werden auch hier die Eisenfeilspähne benutzbar sein.

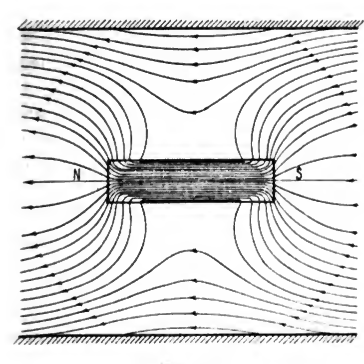


Fig. 30.

Die mit denselben erlangbaren Gruppirungen werden hauptsächlich in der nächsten Umgebung der magnetischen Substanz besonders intensiv und charakteristisch zu Tage treten, weil etwaige neue Anregungen des Luftfeldes, veranlasst durch die Molekülwirbel, von dort ihren Ausgang nehmen müssen. Fig. 30 zeigt schematisch, wie sich die Feilspähne um ein magnetisirtes Stück Eisen gruppiren, das sich im Innern einer geräumigen, stromdurchflossenen Spirale und zwar in der skizzirten Lage, befindet. Vor der Einführung des Eisens ist die Kraftliniengruppirung die in der Fig. 20 kenntlich gemachte; in dem Maasse, in dem die Gruppirung der Fig. 30 davon abweicht, gibt sich der Einfluss der gedrehten Moleküle kund. Die vor allem ins Auge fallende Kraftliniendeformirung ist aber nicht die einzige Erscheinung von Bedeutung; das erheblich verstärkte Gruppirungsbestreben ist eine nicht minder wichtige Thatsache, die darauf hindeutet, dass die Molekülwirbel nicht nur im Innern, sondern auch in der Umgebung feldstärkevermehrend thätig sind. Aber sowohl dieser, als auch der deformirende Einfluss reicht nicht allzuweit über die Umgebung des magnetisirten Eisens hinaus; in entfernteren Regionen des



Spiraleninnern nimmt das Feld immer mehr, und zwar qualitativ und quantitativ, seinen rein elektrischen Charakter wieder an. Entsprechend dem Aussehen der Fig. 30 müssen die Wirbel der gerichteten Molekülketten an den Enden N und S besonders verstärkend auf das Luftfeld einwirken. An diesen erfahren demnach auch die Druckspannungen eine entsprechende Vergrösserung, was zur Folge hat, dass die Kraftlinien an den Enden bürstenartig auseinanderweichen. Die Druckspannungen als die deformirende Ursache des Feldes anzusehen, ist etwas sehr Naheliegendes, nichtsdestoweniger steht die traditionelle Auffassung dazu in völligem Widerspruch, insofern sie dem Eisen die Eigenschaft beilegt, dass dieses die Kraftlinien des elektrischen Feldes an sich heranziehe und dadurch deformire und verdichte.

Wird das elektrische Feld durch Unterbrechen des Stromes entfernt, und ist das Eisen hart genug, um dauernd genügend Magnetismus zu erhalten, dann kann der Eisenfeilspähnversuch den Nachweis erbringen, ob auch das rein magnetische Feld des Eiseninnern die Umgebung wirbelerregend beeinflusst, und in welcher Weise dies geschieht. Fig. 31 gibt ein schematisches Bild von den Versuchsergebnissen. Sie lässt keinen Zweifel darüber aufkommen, dass ein Feld in der Umgebung vorhanden ist. Dieses Feld wird höchstwahrscheinlich dadurch gebildet, dass die bleibend gerichteten Eisenmoleküle die Wirbel der leicht beweglichen Luftmoleküle in bestimmter, durch die Feilspähne angedeuteten Gruppirung erhalten. Ausserdem mag auch noch der Äther der Umgebung von den Eisenmolekülen zur Bildung von Ring-

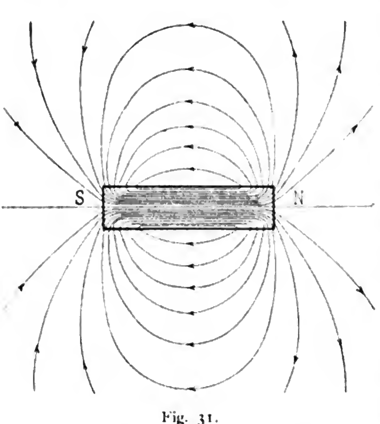
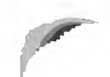


Fig. 31.

wirbeln angeregt werden. Fig. 31 zeigt, dass die Luftfeldstärke direkt an der Oberfläche des Magneten und namentlich an seinen Enden am grössten ist, was sehr dafür spricht, dass die Entstehung des Luftfeldes durch die Wirbel der Eisenmoleküle verursacht wird. Da die stromdurchflossene Spirale, welche aus dem unmagnetischen Eisen einen Dauermagneten erzeugte, ihren Einfluss auf die Formgebung des Luftfeldes nicht mehr zur Geltung bringt, können die Luftkraftlinien ihrem gegenseitigen Abstossungsbestreben vollkommen folgen und biegen sich so um, wie es die Fig. 31 schematisch darstellt. In Folge dieses Umbiegens bilden die Elektrizitätswirbel eine Menge in sich geschlossener Ringe, und wird das gesammte Feld dem einer stromdurchflossenen Leiterspirale (Siehe Fig. 20) ausserordentlich ähnlich. Diese Aehnlichkeit gestattet durch Einstecken eines Eisenkernes in eine Drahtspirale verhältnissmässig sehr kräftige Luftfelder hervorzubringen. Das Luftfeld des Eisenstabes lagert sich über das der Leiterspirale und die Wirbel summiren ihre Zug- und Druckspannungen. Derartige Einrichtungen, welche in der Praxis als Elektromagnete bezeichnet werden, haben eine ausserordentlich vielseitige Verwendung erlangt.

Je länger und je dünner der Dauermagnet geformt ist, desto mehr scheinen sämmtliche Wirbelringe, bezw. Kraftlinien des Luftfeldes ihren Ursprung an den Stabenden zu nehmen. Dort sind die Stellen der höchsten Kraftbethätigung des Luftfeldes. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes darf es nicht Wunder nehmen, dass zu einer Zeit, in der man den Magnetismus als eine Art Flüssigkeit auffasste, diese in den Enden konzentrirt gedacht wurde. Hier übte sie, völlig ohne Zwischenmittel, ihre Kräftewirkungen in die Ferne aus. Das eine Ende erhielt die Bezeichnung Nordpol, das andere die Bezeichnung Südpol. In der Fig. 31 sind die Pole durch die Buchstaben N und S angedeutet. Danach gehört der Nordpol dem Ende an, das Luftkraftlinien mit weggewendeten Pfeilspitzen besitzt, während sich das Ende mit dem Südpol dadurch auszeichnet, dass seine Luftkraftlinien dem Magneten zugewendete Pfeilspitzen aufweisen. Die Flüssigkeitstheorie und alle andern, sich auf den Polbegrift stützenden Anschauungen über den Magnetismus besassen zwar manches Gute, erwiesen sich jedoch als unzulänglich und mussten



der Erklärung mit Hülfe der Kraftlinien weichen. Leider hat sich bei dieser Aufeinanderfolge von Theorien eine höchst ungemütliche Verquickung von Polen mit Kraftlinien herausgebildet, die einer rationellen Entwickelung dieses Wissenszweiges entschieden Abbruch thut. Der Pol hat seine Schuldigkeit gethan, der Pol kann gehen. Zu dieser Erkenntniss wird allerdings die Fachwelt erst dann ihre volle Zustimmung geben, wenn die Bemühungen hinsichtlich der Ausmerzung des Polbegriffes und der Schaffung passender Ersatzmittel, im Rahmen der Wirbeltheorie, auch da von Erfolg gekrönt sind, wo die Poltheorie noch heute ihre Hauptstütze findet, nämlich auf dem Gebiet des Coulomb'schen Kraft- und Mengengesetzes.

Wie oben bemerkt, scheinen fast sämmtliche Luftkraftlinien eines langen und dünnen Magneten ihren Ursprung an den Enden zu nehmen, und zwar ist das Gruppirungsbild derart beschaffen, dass die Luftkraftlinien in beinahe gleicher Dichte radial nach allen Seiten ausgehen. Ein solches Endfeld, von dem übrigen magnetischen Luftfeld isolirt gedacht, hat ausserordentlich viel Ähnlichkeit mit dem Messfeld der Fig. 25. Durch Anwendung gewisser Kunstkniffe wurden Apparate gebaut, welche dem Endfeld gestatteten, für sich in Wirksamkeit zu treten. Die gewonnenen Versuchsergebnisse waren mehr oder weniger von solcher Art, wie sie von einem Messfeld erwartet werden konnten. Zu diesen Ergebnissen gehörte auch der Nachweis, dass ein Messfeld in einem zu untersuchenden Feld einen Bewegungsantrieb längs dessen Kraftlinien erfährt (Siehe Seite 71). Dieser Impuls zum Bewegen erfolgte in der Pfeilrichtung MB der Fig. 25, wenn die Pfeilspitzen der Messfeldkraftlinien von dem Ausgangspunkt M wegwiesen, hingegen entgegengesetzt derselben, wenn die Pfeilspitzen nach M hingerichtet waren. Aus dieser Richtungsverschiedenheit ergibt sich eine praktische Folgerung, die von ausserordentlich grosser

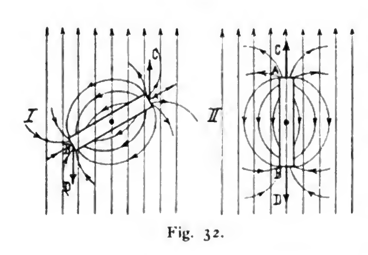


Fig. 32.

Tragweite ist. Wird nämlich ein beweglicher Dauermagnet in ein festes Luftfeld, etwa von der Form der Fig. 32, gebracht, das nicht so stark sein darf, dass der Dauermagnet durch gewaltsames Zurückdrehen seiner Moleküle in seiner Wirksamkeit gestört wird, so kann sich der Dauermagnet nicht vorwärts bewegen, sondern höchstens drehen. Denn das Ende A will in der Richtung AC wandern, das Ende B hingegen in der entgegengesetzten Richtung BD. Dass ein solches Kräftespiel nur eine Drehung zur Folge haben kann, wird wohl Jedermann einleuchten. Die drehende Wirkung auf den Magneten verschwindet, sobald der Drehpunkt und die Angriffslinien AC und BD zusammenfallen, also in einer Lage, die durch Fig. 32 II dargestellt wird. Ein um seinen Drehpunkt leicht bewegbarer Magnet wird nach Ausführung einer bestimmten Anzahl immer kleiner werdender Schwingungen in dieser Lage zur Ruhe gelangen. Da die Angriffslinie CD dann aber die durch den Drehpunkt gehende Kraftlinie tangirt, so bietet ein drehbarer Magnetstab ein vorzügliches Hülfsmittel dar, sich an jeder Stelle eines beliebig geformten Luftfeldes über die daselbst vorhandene Kraftlinienrichtung zu unterrichten. Aus der Dauer der Schwingungen eines Magneten lassen sich obendrein noch sehr wichtige Schlüsse über die Feldstärke des Luftfeldes gewinnen. Es darf daher nicht verwundern, wenn in der Messtechnik der ausgiebigste Gebrauch von drehbaren Magneten gemacht wird. Zurückgreifend auf die im Eingang dieses Abschnittes angeführten Feilspähngruppirungen, erfahren diese jetzt eine sehr einfache Erklärung. Jeder Feilspahn ist eben ein kleiner Magnet, der sich in die Richtung der ihn durchsetzenden Luftfeldkraftlinie eindreht.

Wie auf Seite 94 dargelegt wurde, erzeugt ein Magnet in seiner Umgebung ein Luftfeld und erhält dasselbe auch dauernd aufrecht. Da jedoch von Seiten der Luftmoleküle eine sehr grosse Neigung besteht, sich aus der gerichteten Lage herauszudrehen, so wirken diese den Stahlmolekülen entgegen und suchen den Magneten zu entmagnetisiren. Diese Wirkung kommt hauptsächlich an den Enden zur Geltung und ist um so grösser, je kürzer der Magnet wird. Aus diesem Umstand folgt aber, dass bei der Herstellung von recht kräftigen Dauermagneten nicht nur auf das möglichst weitgehende Drehen der Moleküle,

sondern auch auf eine geeignete Körperform Bedacht zu nehmen ist. Die Wirbelbestandteile, die in dem Magneten verlaufen, bilden mit denen der Umgebung geschlossene Ringe und dementsprechend die zugehörigen Kraftlinienstückchen der Moleküle geschlossene Linienzüge. Je mehr ein solcher Wirbelring Eisenmolekülwirbel im Verhältniss zu Luftmolekülwirbel aufweist, in desto geringerem Umfang können die Luftmoleküle ihr Entmagnetisirungsbestreben bethätigen. Durch Umbiegen eines geradlinigen Magnetstabes werden die von End zu End verlaufenden und dem Luftfeld angehörenden Beträge der einzelnen Wirbelringe verkleinert, demnach auch ihr schädigender Einfluss auf die eingerichteten Eisenmoleküle. Gebogene Magnetstäbe und namentlich solche von Bügelform (Hufeisenmagnet), ertragen einen viel höheren Magnetisirungsgrad als geradlinige. Fig. 33 zeigt das schematische Bild eines Bügelmagneten mit seinem Feld. Weitaus die meisten Kraftlinien erstrecken sich auf einem möglichst kurzen Weg von einem End zum andern und sie würden wohl alle zusammen den kürzesten Weg einschlagen, wenn das gegenseitige Abstossungsbestreben der gleichgerichteten Luftmolekülwirbel nicht das in der Figur charakterisirte Auseinandertreiben zur Folge hätte. Insofern sich die von den Enden ausgehenden Luftfeldkraftlinien in einem verhältnismässig beschränkten Raum ausbreiten, kann sich der von den Eisenmolekülen des Bügelmagneten ausgehende Richtungsimpuls an den einzelnen, ihn erfüllenden Luftmolekülen viel kräftiger bethätigen, als wie bei einem geraden Magnetstabe. Der Nutzen des Umbiegens besteht demnach nicht nur in der Erlangung eines höheren Magnetisirungsgrades, sondern ausserdem in der Hervorbringung eines, wenn auch beschränkten, so doch kräftigen Luftfeldes.

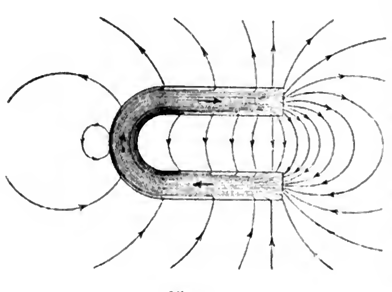
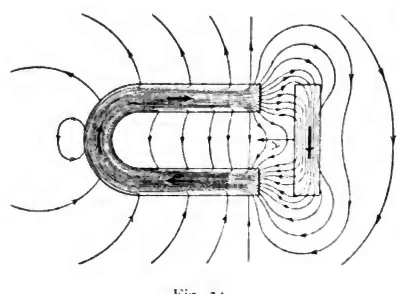


Fig. 33.

Wird ein bewegliches Eisenstück vor die Enden eines befestigten Bügelmagneten gebracht, so verursacht das Luftfeld dieses Magneten ein Drehen der Eisenstückmoleküle und damit die Bildung eines neuen Magneten, der sich ebenfalls ein Luftfeld erzeugt. Das Kraftlinienbild, das die beiden ineinanderliegenden magnetischen Felder ergeben, enthält die Fig. 34 in schematischer Darstellung. In seiner Form zeigt es keine wesentliche Abweichung von dem Kraftfeld der Fig. 33; in seinen sonstigen Eigenschaften hat es jedoch etwas von grosser Verwendungsfähigkeit. Es können sich nämlich die Zugspannungen beider Felder und zwar speziell die der zwischen den Enden des Bügelmagneten und dem Eisenstück liegenden Kraftlinien, Bewegung erzeugend bethätigen. Diese Bewegung erfolgt von seiten des Eisenstückes in einer Richtung, die die sinngemässe Anwendung des auf Seite 70 dargelegten, durch den Pfeil A der Fig. 34 kennzeichnet und dauert solange, bis das Eisenstück auf die Enden des Bügelmagneten prallt. Die anziehende Eigenschaft von Dauer- und auch Elektromagneten in Bügelform auf ein bewegliches Eisenstück, das allgemein die Bezeichnung Anker führt, hat eine ausserordentlich vielseitige Anwendung gefunden. In den Telegraphen und Läutwerken bildet z. B. diese Anzugskraft das Hauptmittel zur Bewältigung der an diese Apparate gestellten Anforderungen.


Fig. 34.

Die bisherigen Entwicklungen haben gezeigt, dass durch das Umbiegen eines geradlinigen Magneten in die Bügelform eine beträchtliche Verstärkung der Luftfeldstärke erzielt wird, die sich hauptsächlich zwischen den Enden kundgibt. Diese Verstärkung wird ohne Zweifel noch weit intensiver werden, wenn der Magnetstab soweit zu einem Ring zusammengebogen

wird, dass sich die Enden beinahe berühren, mithin nur ein schmaler Luftspalt zwischen ihnen bestehen bleibt. Die experimentelle Untersuchung einer derartigen Magnetform ergibt, dass beinahe sämmtliche vorhandenen Luftkraftlinien lediglich in dem Spalt auftreten (Siehe Fig. 35) und dass die Luftfeldstärke an den einzelnen Spaltstellen beinahe von derselben Grösse, wie die Feldstärke an den entsprechenden Querschnittsstellen im Innern des Magneten ist. Diese letztere Thatsache ist von grosser Wichtigkeit; sie beweist, dass das auf Seite 79 ausgesprochene und für ein elektrisches Ringfeld gültige Gesetz von der gleichbleibenden Feldstärke längs einer Kraftlinie, auch auf die Magnetform der Fig. 35 angewendet werden kann, und dass die Feldgestaltung eines Ringmagneten ausserordentliche Ähnlichkeit mit der einer Ringspule (Siehe Fig. 27) aufweist. Zufolge dieser Ähnlichkeit ist es auch bei dieser Leiterform durch Einbringen eines Eisen- oder Stahlringes in das Innere der Ringspule möglich, daselbst ein recht kräftiges, elektromagnetisches Feld hervorzubringen. Enthält der obige Ring statt einen, zwei oder mehr Spalten, dann gilt für diese hinsichtlich ihrer Feldstärke dasselbe, was für den Ring mit einem Spalt dargelegt wurde; wenn auch nicht wegzuleugnen ist, dass die Neigung, auch ausserhalb des Spaltes ein Luftfeld zu erzeugen, mit der Anzahl der Spalten zunimmt. Erträgt ein Ringmagnet das Vorhandensein einer oder mehrerer Spalten, ohne Einbusse des Gesetzes der gleichbleibenden Feldstärke längs den einzelnen Kraftlinien, so wird dies ohne Zweifel auch für eine Ringspule gelten. Thatsächlich zeigt auch der Versuch, dass der Ring in der Fig. 27 nicht vollständig geschlossen zu sein braucht, um obiges Gesetz zu bewahrheiten. Solange das Ringinnere nicht mit Eisen erfüllt ist, darf allerdings der Luftspalt nur sehr klein sein, denn beim Grösserwerden desselben wirkt die Spule sofort auch auf die äussere Nachbarschaft des Spaltes kräftig wirbelbildend ein. Ist jedoch im Innern ein Eisenkern vorhanden und enthält dieser den Luftspalt, dann kann, wie schon ein Herr

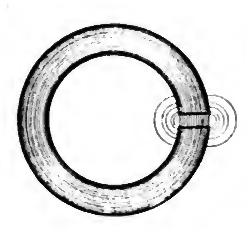


Fig. 35.

Oberbeck durch seine Versuche im Jahre 1878 darlegte, der Ring beträchtlich zu einem Ringstück zusammenschrumpfen, ohne dass die dem Ringgebilde eigenthümliche Erhaltung der Feldstärke verloren geht. Allerdings besteht auch hier das Faktum, dass der Spulenring mit seinem immer grösser werdenden Zusammenschrumpfen in der Richtung der Achse, eine wachsende Neigung zum Bilden eines besonderen Luftfeldes in seiner nächsten Umgebung an den Tag legt; jedoch ist dieses Feld doch nicht so erheblich, um das Charakteristische der Oberbeckschen Versuchsresultate zu verdunkeln. Die Fig. 36 zeigt einen Eisenring mit zwei Luftspalten und einer aufgeschobenen Drahtspirale in Form eines Ringstückes. Ferner den Verlauf des Hauptwirbelfeldes und die Entstehung der schwachen Nebenfelder an der Spule und den beiden Luftspalten.

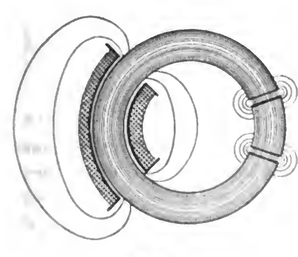


Fig. 36.

Auf Seite 81 wurde dargelegt, dass die Erhaltung der Querschnittsfeldstärke auch dann noch vorhanden ist, wenn der Ring seine Kreisform zu Gunsten irgend eines anderen geometrischen Gebildes aufgibt; oder wenn der Querschnitt der einzelnen Ringstellen von verschiedener Grösse wird. Diese Erhaltung gilt aber auch für den Eisenring der Fig. 36. Auch er kann derartige Formänderungen ertragen, ohne das Erhaltungsgesetz zu unterdrücken.

Ohne Zweifel ist die Möglichkeit, mit Hülfe einer geschlossenen Ringspule oder mit einem auf einen Eisenring geschobenen Ringspulensegment ein Wirbelfeld in eine bestimmte Bahn zu bannen, an sich schon etwas Bedeutungsvolles; ihr Wert wird aber dadurch noch erheblich gesteigert, dass dieses Wirbelfeld, auch bei den grössten Abweichungen in Bezug auf Form und Stoffbeschaffenheit der Bahn, in dieser an allen Stellen eine gleichbleibende Querschnittsfeldstärke aufweist. Die Berechenbarkeit der Querschnittsfeldstärke, bei Kenntniss der wirbelanregenden Kraft der Leiterspirale, dehnt sich damit auf eine

Anzahl neuer Gebilde aus, von denen mehr als Eines hohe Bedeutung in der Elektrotechnik erlangt hat. So lange die Ringspule lediglich mit Luft erfüllt ist, ist mit der auf Seite 77 angeführten Gleichsetzung, in Vereinigung mit der auf Seite 80 gebotenen Erweiterung, das Problem abgethan. Es ergibt sich für diesen Fall die rechnerische Form

$$\mathfrak{H}\,q = 1{,}257\ \frac{S \times z}{l} \times q.$$

Ist die Ringspule ausschliesslich mit Eisen erfüllt, so bietet sich damit ebenfalls immer noch nichts Neues. Die elektrische Querschnittsfeldstärke wird zur elektromagnetischen. $\mathfrak{B}\,q$ und die auf Seite 87 stehende Formel gestattet, nach ihrer Umformung und Mischung mit der obigen, die rechnerische Ermittlung von $\mathfrak{B}\,q$ aus der Gleichsetzung

$$\mathfrak{B}\,q = \mu \times 1{,}257\ \frac{S \times z}{l} \times q.$$

Die Schwierigkeit der Festlegung der Querschnittsfeldstärke beginnt erst dann, wenn das Innere der Ringspule abwechselnd Luft und Eisen enthält. Die Formel, die diesem verallgemeinerten Fall entspricht, wird zwar ebenfalls auf der linken Seite die sich ergebende Querschnittsfeldstärke und auf der rechten den Ausdruck $1{,}257\ S \times z$ aufweisen; im Übrigen aber eine Vereinigung so vieler l-, q- und teilweise μ-Werte enthalten, wie Ringbestandteile vorhanden sind. Die mathematische Form, in der sich die Vereinigung vollzieht, kann, in Hinblick auf die Aneinanderreihung der Bestandteile zu einem Ringgebilde, nur die der Addition sein. Die dementsprechende Ausgestaltungsart der Gleichsetzung springt sofort ins Auge, wenn die obigen rechnerischen Formen, durch Teilung des Zählers und Nenners mit q bezw. $\mu\,q$ etwas umgestaltet werden. Auf diese Weise erhält z. B. $\mathfrak{B}\,q$ den gleichwertigen Ausdruck $\dfrac{1{,}257\ S \times z}{\dfrac{l}{\mu\,q}}$. Was an ihm auffällt, ist die grosse Formähnlichkeit mit dem erweiterten Ohmschen Gesetz, welches heisst: $S = \dfrac{E}{\dfrac{L}{\frac{1}{s}\,Q}}$. Aber nicht nur

in der Form, sondern auch in der Bedeutung der einzelnen Grössen ist Ähnlichkeit vorhanden. S ist die sekundliche, durch den Gesammtquerschnitt fliessende Strommenge; $\mathfrak{B}$ q ist die Feldstärke des Gesammtquerschnittes. E ist die das Fliessen der Elektrizität bewirkende Kraft; 1,257 S $\times$ z ist die das Wirbelfeld bildende Ursache. L ist die Leiterlänge und Q der Leiterquerschnitt; l ist die Ringlänge und q der Ringquerschnitt. $\frac{1}{s}$ ist die Leitungsfähigkeit; μ ist die Durchlässigkeit. Um diese Ähnlichkeit ja recht herauszustreichen, waren die Elektrotechniker emsig bemüht, auch gleichlautende Namen zu ersinnen. 1,257 S $\times$ z wurde magnetomotorische Kraft und $\frac{l}{\mu\, q}$ magnetischer Widerstand genannt. Aber damit noch nicht genug; es musste auch noch eine Ähnlichkeit in den physikalischen Vorgängen geschaffen werden. Der missdeutende Begriff des Kraftlinienflusses war das Resultat der Anstrengungen. Durch die Einführung der hier gekennzeichneten Berechnungsmethoden ringförmiger Wirbelfelder in die Praxis (1885/86), haben sich die Herren Kapp und Gebrüder Hopkinson sehr verdient gemacht. Da sich l, q und μ, durch die Umformung der obigen Gleichsetzung, ausschliesslich auf den Nenner des Bruches beschränken, vollzieht sich in zusammengesetzten Ausdrücken daselbst auch die Addition der einzelnen magnetischen Widerstände. Zur Darstellung einer zusammengesetzten Form diene das in der Fig. 37 skizzirte Ringgebilde. Es lehnt sich dasselbe an weitverbreitete Vorbilder aus der elektrischen Maschinentechnik an und besteht aus einem beinahe geschlossenen, rechteckigen Rahmen aus Dynamogussstahl, auf welchem in A und B stromdurchflossene Drahtspulen angebracht sind. Die Rahmenlücke ist, bis auf zwei schmale Luftspalten, mit einem Kern aus

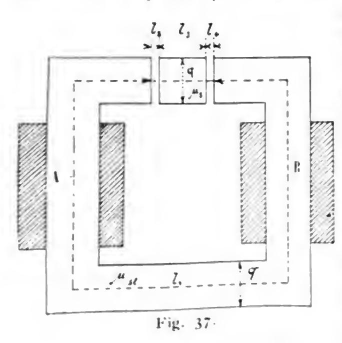


Fig. 37.



Schmiedeisen, von der Querschnittsform des Rahmens ausgefüllt. Die Längen-, Querschnitts- und Durchlässigkeitsgrössen sind in der Zeichnung durch passend gesetzte Buchstaben kenntlichgemacht; die gestrichelte Linie stellt die mittlere Kraftlinie dar und in ihren durch die Pfeile abgegrenzten Teilen die Längen l_1, l_2, l_3 und l_4 der einzelnen magnetischen Widerstände. Demnach ergibt sich für den magnetischen Widerstand des Stahlrahmens $\frac{l_1}{\mu_{st} q}$, für den des einen Luftspaltes $\frac{l_2}{q}$, für den des schmiedeisernen Kerns $\frac{l_3}{\mu_s q}$ und für den des andern Luftspaltes $\frac{l_4}{q}$.

Durch Addition aller dieser Einzelwiderstände ergibt sich der Ausdruck für den magnetischen Widerstand des gesammten Kreises, also $\frac{l_1}{\mu_{st} q} + \frac{l_2}{q} + \frac{l_3}{\mu_s q} + \frac{l_4}{q}$. Die Berechnungsformel der elektromagnetischen Querschnittsfeldstärke des zusammengesetzten Ringes der Fig. 37 wird dementsprechend lauten:

$$\mathfrak{B}_q = \frac{1{,}257\, S \times z}{\frac{l_1}{\mu_{st} q} + \frac{l_2}{q} + \frac{l_3}{\mu_s q} + \frac{l_4}{q}}.$$

Um die praktische Handhabung einer derartigen Gleichsetzung kennenzulernen, sei noch ein Zahlenbeispiel beigefügt.

A u f g a b e. Das Ringgebilde der Fig. 37 besitze folgende Abmessungen:

$l_1 = 130$ cm $\quad l_3 = 10$ cm

$l_2 = 0{,}4$ cm $\quad l_4 = 0{,}4$ cm.

Der Querschnitt des Ringes sei quadratisch und überall von derselben Grösse; die Quadratseite betrage 10 cm. Der Dynamogussstahl und das Schmiedeisen sollen den magnetischen Stoffen entsprechen, deren feldstärkevermehrenden Eigenschaften auf der zwischen den Seiten 86 und 87 beigehefteten Tafel zeichnerisch wiedergegeben sind.

Die elektromagnetische Feldstärke $\mathfrak{B}$ des der mittleren Kraftlinie angehörenden Wirbels sei 14000 Dynen. Zu bestimmen ist die Anzahl der Ampèrewindungen, die zur Hervorbringung von 14000 Dynen in dem Kreise erforderlich wird; ausserdem aber noch die Anzahl der Windungen selbst, unter der Annahme, dass 5 A zur Speisung der beiden Drahtspulen zur Verfügung stehen.

Lösung. Ehe die einzelnen magnetischen Widerstände berechnet werden können, sind erst die Durchlässigkeiten μ_{st} und μ_s festzustellen. Dies ist, mit Hülfe der Kurventafel und bei Kenntniss von $\mathfrak{B}$, eine leichte Sache. Es ergibt sich aus derselben, für $\mathfrak{B} = 14000$, $\mu_{st} = 1170$ und $\mu_s = 800$. Demnach ist der magnetische Widerstand

des Stahlrahmens $= \frac{130}{1170 \times 10^2} = 0{,}00111$,

des einen Luftspaltes $= \frac{0{,}4}{10^2} = 0{,}00400$,

des schmiedeisernen Kernes $= \frac{10}{800 \times 10^2} = 0{,}00012$,

des andern Luftspaltes $= \frac{0{,}4}{10^2} = 0{,}00400$,

und der gesammte magnetische Widerstand $0{,}00111 + 0{,}00400 + 0{,}00012 + 0{,}00400 = 0{,}00923$.

Was an den einzelnen Summanden auffällt, ist die verhältnissmässige Grösse derjenigen der Luftspalten. Es wird mit derselben zahlenmässig bestätigt, was schon die vorausgegangenen Entwicklungen erkennen liessen, nämlich das, dass selbst ein in seiner Längenausdehnung sehr beschränkter Luftspalt, die wirbelerregende Kraft einer Drahtspule sehr herabdrückt.

Da gemäss der gestellten Aufgabe nicht $\mathfrak{B}\,q$, sondern $S \times z$ ermittelt werden soll, so bedarf die oben gegebene Berechnungsformel einer entsprechenden Umstellung, die ihr die Gestalt

$$S \times z = \frac{\mathfrak{B}\,q \left(\frac{l_1}{\mu_{st}\,q} + \frac{l_2}{q} + \frac{l_3}{\mu_s\,q} + \frac{l_4}{q}\right)}{1{,}257}$$

gibt. Werden die gegebenen und zum Teil berechneten Zahlenwerte in dieselben eingesetzt, so ist

$$S \times z = \frac{14000 \times 100 \times 0{,}00923}{1{,}257} = 10280,$$

und die gesammte Windungszahl

$$z = \frac{10280}{5} = 2056,$$

sowie die jeder Spule

$$\frac{z}{2} = \frac{2056}{2} = 1028.$$

Würde das hiemit vollständig rechnerisch bestimmte Ringgebilde aufs Genaueste hergestellt und mit 5 A gespeist werden, so müsste eine vorgenommene Messung eine Querschnittsfeldstärke von 14000 × 100 = 1 400 000 Dynqcm in den Luftspalten ergeben, wenn nicht noch ein Nebenumstand hinzuträte, der dieses erwartete Resultat etwas beeinflusste. Dieser Nebenumstand besteht in der Bildung der bereits auf Seite 100 u. flgd. charakterisirten Nebenfelder. Die Nebenfelder haben die Wirkung, dass in den Luftspalten durch eine magnetomotorische Kraft von bestimmter Grösse kein so kräftiges Wirbelfeld auftreten kann, wie es die Rechnung verlangt. Die Nebenfelder nehmen einen mehr oder minder grossen Teil der felderzeugenden Eigenschaft der Drahtspulen in Beschlag. Soll das Wirbelfeld dennoch zu der vorgeschriebenen Stärke hinaufgetrieben werden, so ist die Ampèrewindungszahl um so viel zu vergrössern, wie die Nebenfelder zu ihrer Hervorbringung beanspruchen. Die Grösse des Zusatzbetrages an Ampèrewindungen wird mathematisch durch den Zerstreuungsfaktor dargestellt. Mit diesem ist der berechnete Zahlenwert zu vervielfachen, um die wirklich erforderlichen Ampèrewindungen zu erlangen. Der Zerstreuungsfaktor ist je nach der Art der räumlichen Ausgestaltung des Ringfeldes und der Grösse der felderzeugenden Ursachen, eine Zahl, die so ziemlich alle möglichen Stufen zwischen 1 und 2 einnimmt. Sie lässt sich für jeden Sonderfall zwar angenähert berechnen, kann aber immerhin erst dann Anspruch auf Genauigkeit machen, wenn sie durch Messungen ermittelt wird. Wird der Zerstreuungsfaktor für das Ringgebilde der Fig. 37 zu 1,4 angenommen, so ist die Ampèrewindungszahl 10280 auf 1,4 × 10280 = 14392 zu



erhöhen, was bei Beibehaltung der angenommenen 5 A einer gesammten Windungszahl von rund 2878 entspricht.

Mit den bisherigen Darlegungen sind die belangreicheren quantitativen Verhältnisse der Elektrizitätswirbel genügend gekennzeichnet. Es erübrigt nun noch, auch jene Erscheinungen nach ihrer quantitativen Seite zu untersuchen, die in den auf Seite 64 beschriebenen Bewegungsantrieben bestehen. Die Betrachtungen sollen jedoch nicht an die Figuren 16 und 17 geknüpft werden, sondern es sei eine Feldkombination angenommen, die aus dem Felde eines geradlinigen Leiters und dem des Luftspaltes eines eisengeschlossenen Ringes besteht. Die Bevorzugung gerade dieser Kombination ist darin begründet, dass sie gleichsam den Elementarvorgang in einer sehr wichtigen Klasse von Nutzapparaten, nämlich den Elektromotoren, verbildlicht.

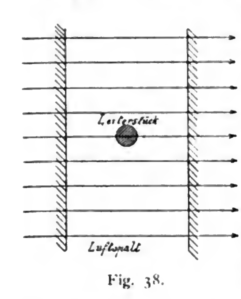


Fig. 38.

In der Fig. 38 ist ein Luftspaltbestandteil mit einem darin befindlichen geradlinigen Leiterstück bildlich dargestellt. Sie zeigt, dass das Leiterstück senkrecht zu den den Spalt durchsetzenden Kraftlinien, und beide Gebilde, hinsichtlich ihrer Längenausdehnung, senkrecht zu der Papierebene gedacht sind. Solange kein Strom in dem Leiter vorhanden ist, ist nichts Aussergewöhnliches von der nebenstehenden Anordnung zu erwarten; erst mit dem Auftreten eines solchen entstehen Wirkungen, deren Kennenlernung von grosser Wichtigkeit ist. Zu dem Luftspaltfeld tritt noch ein zweites Wirbelfeld hinzu, das dem Leiterstück angehört und in seiner Kraftliniengruppirung die bereits auf Seite 61 charakterisirten konzentrischen Kreise aufweist. Unter der Annahme, dass der Strom die Richtung in die Papierebene besitzt, sind die Kreise in der in Fig. 39 gegebenen Weise mit Pfeilen

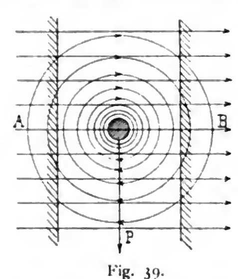


Fig. 39.

auszustatten. Dementsprechend müssen die oberhalb der Scheidungslinie A B liegenden Kreisbestandteile *verstärkend* auf das entsprechende Spaltfeld einwirken, während die unterhalb liegenden Bestandteile auf das ebenda vorhandene Luftfeld eine *Abschwächung* ausüben. Dieses verschiedene Verhalten der Kreisbestandteile bewirkt, dass dem oberhalb AB, zwischen den gleichgerichteten Kraftlinien der beiden Felder auftretenden *Ausweichungstrieb* unten kein Gegentrieb entspricht. Aus dieser Thatsache geht als letzte und wichtigste Folgerung hervor, dass das geradlinige Leiterstück einen *Bewegungsantrieb* in der Richtung P erfahren muss. Diese Folgerung lässt sich sehr leicht durch das Experiment bewahrheiten, sie erhellt aber auch aus der Gestalt des bei einem unbeweglichen Leiter sich bildenden Kombinationsfeldes, die z. B. in der Fig. 40 ihre Abbildung erfährt. Mit der Umkehrung der Strom- oder der Kraftlinienrichtung muss auch der Bewegungsantrieb P seine Richtung ins Entgegengesetzte wenden.

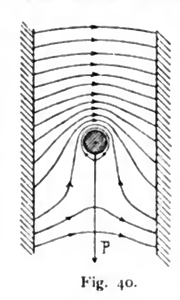


Fig. 40.

Um sich möglichst schnell über die dritte Richtung orientiren zu können, wenn die beiden andern bekannt sind, leistet die nachstehende und durch die Fig. 41 verbildlichte Gedächtnissregel sehr gute Dienste. Die drei ersten Finger der *linken* Hand sind so auseinanderzuspreizen, dass sie, so gut als möglich, rechte Winkel mit einander bilden. Wird nun die Richtung des Zeigefingers mit der Richtung der Luftspaltkraftlinie und die Richtung des Mittelfingers mit der Stromrichtung in Übereinstimmung gebracht, dann gibt die Richtung des Daumens die Richtung des Bewegungsantriebes an.

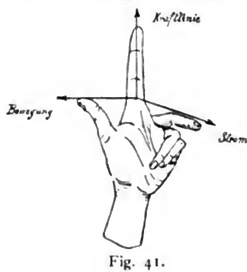


Fig. 41.

Die Grösse des durch die bisherigen Entwicklungen festgestellten Bewegungsantriebes ist von 4 Faktoren abhängig, deren Beeinflussungsart gesetzmässig zu ergründen ist, wenn die



Antriebsgrösse auf rein rechnerischem Wege ermittelbar werden soll. Die beeinflussenden Faktoren sind: Die räumliche Lage des Leiterstückes zu den Spaltkraftlinien, die Spaltfeldstärke 𝔅, die Stromstärke S und die Leiterlänge L. Der stromführende Leiter ist so in dem Spalt gelagert gedacht, dass er nicht nur zu dessen Kraftlinien eine senkrechte Neigung besitzt, sondern auch zu der Spaltzeichnung eine wagrechte Disposition aufweist. Von dieser besondern Lage sind die verschiedensten Abweichungen möglich, von denen diejenigen, welche sich ausschliesslich auf die lotrechte Ebene erstrecken, das Hauptinteresse in Anspruch nehmen. Ausserdem können auch Abweichungen in der wagrechten Ebene und solche in beiden Ebenen zusammen, auftreten; die ersteren werden sich in Folge der geringen Längenausdehnung des Spaltes in engen Grenzen halten. Da der Bewegungsantrieb auf den Leiter senkrecht zu dessen Achse gerichtet ist, muss eine Drehung in der lotrechten Ebene bewirken, dass dieser Antrieb seine Richtung, entsprechend dem Drehwinkel, ändert. Ist die Möglichkeit einer Dauerbewegung des Leiters nur in der Richtung P vorhanden, der Leiter also dementsprechend mechanisch geführt, so hat die Drehung eine Abnahme der nach P gerichteten Kraft zur Folge. Die Kraft P ist nur noch eine Komponente der gesammten Antriebskraft; die andere Komponente, welche den Verlust verkörpert, ist senkrecht zu P gerichtet. Bei einer Drehung um 90° verschwindet die Kraft P gänzlich und fällt der gesammte Antrieb, sowohl hinsichtlich Grösse als auch Richtung, mit der senkrechten Komponente zusammen. Wird das Leiterstück in der wagrechten Ebene um 90° gedreht (vorausgesetzt, dass dieses möglich ist), so verschwindet damit die beschriebene verstärkende Wirkung der in der Fig. 39 oberhalb A B liegenden Kreisbestandteile und ebenso die abschwächende Wirkung der unterhalb liegenden Wirbelstücke gänzlich, damit aber auch der Bewegungsantrieb P. Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass ein jedes und wenn auch noch so kleines wagrechtes Drehen des Leiterstückes aus der ursprünglichen Lage mit einer Abnahme der Kraft P verknüpft ist. Die Betrachtungen über den Einfluss der räumlichen Lage des Leiterstückes zu den Spaltkraftlinien gipfeln nach allem dem in der Erkenntniss, dass die grösstmögliche Antriebskraft nur dann vorhanden ist, wenn

der Leiter eine den Fig. 38 bis 40 entsprechende Lagerung aufweist. Für die Grösse der Kraft P sind des Weitern 𝔅, S und L bestimmend. Die Beeinflussungsart dieser 3 Faktoren ist von einfacher Gestaltung und verrät sich dem darüber Nachdenkenden sehr leicht. Einen vollgültigen Aufschluss ergibt allerdings nur das Experiment. Dieses zeigt, dass sich der Bewegungsantrieb in demselben Maasse und Sinne wie 𝔅 oder S oder L ändert. Der rechnungsmässige Einfluss dieser 3 Grössen ist demnach ein rein vervielfachender. Ist die Stromstärke in dem Leiter 1 A, die Spaltfeldstärke 1 Dyne und die Leiterlänge 1 cm, so zeigt eine angestellte Messung, dass der Bewegungsantrieb P die Grösse von $^1/_{10}$ Dyne, oder was gleichwertig ist, von $\frac{1}{9810}$ gr oder $\frac{1}{9810000}$ kgr annimmt. Allerdings ist dabei Voraussetzung, dass dieses Leiterstück von der Einheitslänge, die in der Fig. 38 angedeutete Spaltlage besitzt. Unter dieser Voraussetzung gilt aber auch die nachstehende Formel, welche die allgemein gültige und nach dem Obigen nunmehr leicht feststellbare Beziehung zwischen P und den beeinflussenden Grössen darstellt. Dieselbe lautet, je nach der Wahl der Krafteinheit

$$P = \begin{cases} \frac{\mathfrak{B} \times S \times L}{10} \text{ Dynen} \\ \frac{\mathfrak{B} \times S \times L}{9810} \text{ gr} \\ \frac{\mathfrak{B} \times S \times L}{9810000} \text{ kgr.} \end{cases}$$

An diese Gleichsetzung knüpfe sich ein Zahlenbeispiel an.

Aufgabe. Der auf einen Leiter von der Länge 30 cm auszuübende Bewegungsantrieb betrage 0,500 kgr. Der Leiter besitze einen Querschnitt, der 20 zur Verfügung stehende Ampères durchzulassen im Stande ist. Auf welche Höhe muss die Spaltfeldstärke 𝔅 getrieben werden, um den verlangten Antrieb zu erzielen?

Lösung. Durch eine kleine Umformung der P-Formel entsteht das neue Gebilde

$$\mathfrak{B} = \frac{9810000 \times P}{S \times L},$$

welches der 𝔅-Ermittlung als Rechnungsschema dient.

Werden die in der Aufgabe gegebenen Zahlenwerte sinngemäss eingesetzt, so ergibt sich für

$$\mathfrak{B} = \frac{9810000 \times 0{,}5}{20 \times 30} = 8175 \text{ Dynen.}$$

Wenn auch mit den Grössen $\mathfrak{B}$, S und L genügend Bestandteile zur Hervorbringung eventuell geforderter hoher Kraftbeträge gegeben sind, so hat sich doch der Elektrotechniker noch eines weitern bemächtigt und von demselben bei dem Motorenbau den weitgehendsten Gebrauch gemacht. Anstatt nur einen Leiter in dem Spalte anzuordnen, bringt er möglichst viele in demselben unter und vereinigt sie so miteinander, dass sich ihre Bewegungsantriebe summiren. Eingehendere Auslassungen über dieses Vergrösserungsmittel hängen so innig mit dem Wesen des Elektromotors zusammen, dass sie einem Kapitel, das diesen so überaus wichtigen Nutzapparat zum Gegenstand hat, einzuverleiben sind.

Damit, dass bei der oben beschriebenen Anordnung ein Bewegungsantrieb auftritt, ist, wenn er sich nicht gleichzeitig Bewegung verursachend bethätigen kann, noch keine Nutzanwendung von Bedeutung möglich. Erst in dem Augenblick, in dem die Kraft P das Leiterstück zu einer Ortsveränderung veranlasst, ist der Urtypus des Elektromotors in voller Wirksamkeit. Das bewegte Leiterstück leistet mechanische Arbeit, indem es zum Teil mechanische Widerstandskräfte überwindet, zum Teil sogenannte lebendige Kraft in sich aufspeichert. Das dieser mechanischen Arbeit entsprechende Energiequantum entstammt dem Leiterstückstromkreis. Darüber, wie und wie weit dieser Stromkreis auf Energieentnahme beansprucht wird und über verschiedenes Anderes, das bei der Wanderung der Energie aus dem Leiter durch das Feld nach den Bewegungsmechanismen, für das volle Verständniss von Interesse ist, kann erst dann lückenlos gesprochen werden, wenn der Eingang des nächstfolgenden Abschnittes zur Kenntniss gelangte.

Abschnitt IV.

Die Induktion, ihr Wesen und ihr allgemeines Entstehungsgesetz in qualitativer und quantitativer Hinsicht. Induktion durch Bewegung und Induktion durch Wechselströme, die Stromrichtungsregeln und die mathematischen Formulirungen des spezialisirten allgemeinen Quantitätsgesetzes. Die Induktions- und Bewegungserscheinungen im Rahmen des Gesetzes der Erhaltung der Energie. Die Ursachen, das Wesen und die Wirkungen der Selbstinduktion in Wechselstromkreisen.

Als gleich im Eingang des 19. Jahrhunderts der Bologneser Arzt Galvani und der Physikprofessor Volta in Pavia die fliessende Elektrizität als Neuheit auf die Tagesordnung setzten und ihr Wesen durchforschten, wurde während zweier Jahrzehnte aufs emsigste an der Gewinnung eines genaueren Einblickes in die quantitativen und qualitativen Verhältnisse der neuen Elektrizitätszustandsform gearbeitet. Alle nach dieser Richtung angestellten Untersuchungen waren jedoch solcher Art, dass Niemand in fruchtbringender Weise auf den Gedanken geführt wurde, die Umgebung der stromdurchflossenen Leiter als Schauplatz wichtiger Vorgänge zu ergründen. Es war Sache der Entdeckung, die Wege nach dieser Richtung aufzuschliessen. Der Kopenhagener Physiker Örstedt verwirklichte diese, indem ihm im Jahre 1820 der experimentelle Nachweis des auf Seite 97 beschriebenen drehenden Antriebes elektrischer Felder auf Magnetstäbe gelang.



Der bereits an früherer Stelle namhaft gemachte Pariser Polytechniker Ampère und viele Andere knüpften hieran eine Menge Untersuchungen über das Verhalten von verschiedenst gearteten Feldern und bemühten sich in das verwickelte Gebiet der wirbelnden Elektrizität Ordnung und Klarheit zu bringen. Es verging abermals ein volles Jahrzehnt, ehe sich aus dem erweiterten Kenntnisstand die Schlussfolgerung aufdrängte, dass, wenn der elektrische Strom ein Wirbelfeld erzeugen könne, auch das Umgekehrte gelten müsse. Sie führte zur Entdeckung einer neuen Klasse von Erscheinungen, die, in ihrer Gesammtheit, an Tragweite denen der wirbelnden Elektrizität ebenbürtig wurden, und deren systematische Darstellung Gegenstand des vierten und zugleich letzten Abschnittes ist. Das Mitglied der »Royal Institution«, Michael Faraday[1]), befand sich im Jahre 1830 in der Lage, der wissenschaftlichen Welt in einer grossen Reihe, damals Aufsehen erregenden Experimenten, den Wahrheitsbeweis der gezogenen Schlussfolgerung vorzuführen. Faraday war aber nicht nur bahnbrechend auf diesem neuen Gebiete, sondern er durchforschte dasselbe auch nach allen Richtungen und schuf Regeln und Gesetze in solch umfassender Weise, dass den Nachfolgenden nicht viel Neues zum Hinzufügen übrig blieb. Sie beschränkten sich mehr darauf, das Ganze übersichtlich und einheitlich zu gestalten und den Bedürfnissen der herangewachsenen Elektrotechnik anzupassen. Auch hat es zu keiner Zeit an Versuchen gefehlt, die entdeckten Erscheinungen auf rein mechanische Vorgänge zurückzuführen, ohne dass dieselben jedoch zu irgendwie nennenswerter Bedeutung gelangten. In dem vorliegenden Buche ist bei der Darstellung des neuen Gegenstandes in erster Linie auf die Bedürfnisse der Leser und dann auf den beschränkten Raum Rücksicht zu nehmen gewesen. Dem Selbstdenkenden wird es bei gehöriger Durcharbeitung des Gebotenen nicht schwer werden, die knappen Formen speziellen Fällen, irgendwelcher Art, anzupassen.

---

[1]) Michael Faraday, 1791—1867, war gelernter Buchbinder, arbeitete sich sehr bald zum Lehrer an der »Royal Institution« in die Höhe und wirkte während beinahe einem halben Jahrhundert mit grossem Erfolg, namentlich auf den Gebieten der Elektrizitätslehre und Chemie, an dieser Anstalt.

Wenn in den vorausgeschickten, kurzen, geschichtlichen Darlegungen darauf hingewiesen wurde, dass Wirbelfelder im Stande sind, Ströme zu erzeugen, so ist, bei der Absicht, das Einschlägige näher kennenzulernen, die erste Aufgabe die, festzustellen, auf welche Art und in welchem Umfang die Strombildung hervorgerufen wird. Grundlegend kann hiebei nur die experimentelle Forschung sein; dem Verstande wird alsdann die Rolle zuteil, aus der grossen Fülle der Versuchsresultate das allgemeine Entstehungsgesetz der Ströme herauszuschälen. Mag dieses Gesetz beschaffen sein wie es will, Eines wird schon jetzt dem schärferen Beurteiler einleuchten: Die grosse Bedeutung, die dasselbe für die Elektrotechnik haben musste. In der That verdankt die Elektrotechnik ihren hohen Wert und ihre eminente Entwicklung einzig und allein der Thatsache, dass durch Felder Ströme geschaffen werden können. Für das neue Gebiet hatte schon Faraday einige besondere Bezeichnungen eingeführt, die sich bis heute erhalten haben und die auch in dem vorliegenden Abschnitt zur Verwendung gelangen. Der Vorgang des Stromerzeugens wird Induktion genannt; das den Strom hervorbringende Wirbelfeld heisst induzirendes Feld und der hervorgebrachte Strom bezw. dessen Spannung induzirter Strom bezw. induzirte Spannung. Während der geschichtliche Werdegang der Induktionslehre vom Einzelnen zum Allgemeinen führte, ist für den Wissenaufnehmenden die umgekehrte Richtung einzuhalten. Indem er sich von vornherein mit dem allgemein Gültigen vertraut macht, lernt er die ihn fesselnden Spezialfälle unter höheren Gesichtspunkten, und damit auch klarer, kennen. Das allgemeine Entstehungsgesetz der Induktion, für das sich demnach der Leser in erster Linie zu interessiren hat, lautet: Wird ein geschlossener, aber stromloser Leiterkreis, dem hinsichtlich der Form, der räumlichen Ausdehnung und der Art seiner Bestandteile keinerlei Beschränkungen auferlegt sind, in seiner gesammten oder auch nur teilweisen Querschnittsfläche von Kraftlinien eines fremden Feldes durchsetzt, so repräsentiren die an den einzelnen Durchsetzungsstellen vorhandenen Zugspannungen dieser Kraftlinien in ihrer Gesammtheit etwas Ähnliches wie jene Querschnittsfeldstärke, welche auf Seite 80 in ihrer Bedeutung gekennzeichnet wurde. So lange sich an der

Grösse dieser gesammten Feldstärke nichts ändert, ist selbst mit den feinsten Messinstrumenten kein Strom in dem Leiterkreis wahrzunehmen. Tritt jedoch eine solche Änderung ein und zwar dadurch, dass entweder Kraftlinien aus der Fläche treten, oder neue zu den bereits vorhandenen hinzukommen, oder die Wirbelgeschwindigkeit sich erhöht oder erniedrigt, oder dadurch, dass Mischungen dieser Änderungsarten zur Geltung gelangen, so entsteht sofort ein Strom, der solange anhält, wie die Grössenänderung der gesammten Feldstärke vorsichgeht und mit dieser verschwindet. Dieses Entstehungsgesetz für Ströme zeigt, dass die blosse Existenz von Wirbelfeldern noch nicht genügend ist, um eine Strombildung zu erzielen, sondern dass diese einzig und allein entweder durch eine Anzahländerung der durchsetzenden Kraftlinien, oder durch eine Änderung der Wirbelgeschwindigkeit eingeleitet und aufrecht erhalten werden kann. Die Erfahrungen, die sich aus dem verallgemeinerten Gesetz ergeben, waren für die Induktionslehre tief einschneidend und grundlegend. Sie konnten allerdings bis jetzt über einen Punkt keinerlei Aufklärungen geben, nämlich über die Natur der wirklich statthabenden und ohne Zweifel rein mechanischen Vorgänge. Thatsächlich klafft in diesem Wissensbestandteil über das Wesen der Induktion immer noch eine grosse Lücke. Sollte es einmal gelingen, einen tieferen Einblick in das bei der Induktion vorsichgehende Spiel der Elektrizitätswirbel und der Leitermoleküle zu erlangen, dann wird wahrscheinlich die merkwürdige Konsequenz zu Tage treten, dass der induzirte Strom keine Erscheinung darstellt, die sich, wie bisher angenommen wird, mit einer fliessenden Flüssigkeit vergleichen lässt, sondern eine solche, mit wesentlich anders gearteter Bewegungsform.

Bei einer experimentellen Überprüfung des Induktionsgesetzes haben die zur Verwendung gelangenden Vorrichtungen die Aufgabe, durch ihr Wirken irgend eine der angegebenen Änderungsarten auszuführen. Handelt es sich dabei um eine Vermehrung oder Verminderung der Kraftlinienanzahl, so ist eine passende Ortsveränderung der felderzeugenden Ursache, oder des Leiterkreises, oder aber beider Teile zugleich, das einfachste Mittel, um solche Wirkungen und damit auch induzirte Ströme ins Leben zu rufen. Hiebei kann mit Fug und Recht

von einer Stromerzeugung aus *mechanischer Bewegung* gesprochen werden, obwohl nicht sie, sondern die in ihrer Anzahl geänderten Kraftlinien induzirend wirken. Wesentlich anders, wie ortsverändernd, ist das Mittel beschaffen, welches Wirbelgeschwindigkeiten zu ändern und damit Induktionserscheinungen hervorzubringen hat. Es besteht, in seiner ausgeprägtesten Form, in der Anwendung von Wechselströmen als Veranlasser des Wirbelfeldes. Da derartige Ströme jeden Augenblick einen anderen Grössenbetrag aufweisen, so werden auch die Geschwindigkeiten der erzeugten Wirbel fortwährenden Änderungen unterliegen. In dem vorliegenden Falle ist die Berechtigung, von einer Stromerzeugung aus *Wechselströmen* zu sprechen, nicht so ohne Weiteres von der Hand zu weisen. Bei dem grossen Spielraum, der hinsichtlich der Art der mechanischen Bewegung und der Art der Feldstromänderung, sowie hinsichtlich der Form und der Natur des induzirenden Feldes ohne Zweifel vorhanden ist, darf es nicht überraschen, dass, Induktionsströme nachzuweisen, auf hunderterlei Wegen möglich ist. Dieser Umstand hat leider nicht gerade dazu verholfen, in das Induktionsgebiet der Elektrizitätslehre grosse Klarheit zu bringen. Eine grosse Menge gangbarer Lehrbücher enthalten über dieses Thema soviel zusammenhangloses Versuchsmaterial aufgespeichert, dass ein jeder Neuling, der sich nicht in dem Besitze des roten Fadens, worunter das allgemeine Induktionsgesetz zu verstehen ist, befindet, bei dem Hindurcharbeiten in komplette Sinnesverwirrung geraten muss. Der wirkliche, aus dem Studium solcher Bücher gezogene Nutzen steht in keinem Verhältniss zu dem Zeitaufwand und der geistigen Mühe, die seine Erlangung kosteten.

Die Anzahl der Kraftlinien, oder deren Wirbelgeschwindigkeit zu ändern, sind zwei gänzlich verschiedene Forderungen, die zwar auf dieselbe Wirkung hinauslaufen, aber diese durch abweichende Vorgänge erreichen und dazu ausserdem grundverschiedene experimentelle Mittel in Anspruch nehmen. Die praktische Ausgestaltung der Induktionstheorie ist dieser Verschiedenheit gefolgt und hat für die Induktion aus mechanischer Bewegung und für die aus Wechselströmen formell abweichende Beziehungen und Gesetze ermittelt, die den Stempel der Entstehungsart der induzirten Ströme an der Stirne tragen. Zur

Vermeidung von Unklarheiten und Zweideutigem ist es rätlich, den Übergang dieser Spezialitäten zum allgemeinen Entstehungsgesetz klarzulegen und damit ihre letztinstanzliche Zusammengehörigkeit zu bekunden. Für das Allgemeingesetz ist und bleibt es gleichgültig, ob die Änderung des induzirenden Feldes durch Vermehren bezw. Vermindern der Kraftlinienanzahl oder der Wirbelgeschwindigkeit erfolgt; wie es für dasselbe auch gleichgültig ist, ob das induzirende Feld rein elektrischen oder magnetischen, oder endlich elektromagnetischen Ursprunges ist. In manchen Fällen, in denen der detaillirte Hergang der Feldänderung, in Folge der Eigenart der angewandten Einrichtung, nicht so klar auf der Hand lag, tauchten heftige Meinungsverschiedenheiten auf, welche in der Regel sehr bald auf die Unsicherheit und Zusammenhangslosigkeit in der Induktionslehre hinüberspielten. Eine Gedankenhaltung, wie die obige, hätte jedem Streit im vornherein die Spitze abgebrochen.

Was die quantitativen Verhältnisse anbetrifft, die sich bei dem Vorgang der Induktion bemerkbar machen, so lassen sich hierauf abzielende Schlussfolgerungen aus dem allgemeinen Entstehungsgesetz der induzirten Ströme entnehmen. Schon ein wenig Nachdenken über die an dieses Gesetz sich knüpfenden Erweiterungen, wird über die Art der Abhängigkeit des induzirten Produktes von den induzirenden Faktoren Aufklärung geben. Ob die Aufklärungen richtig und erschöpfend sind, das zu beweisen, bleibt Sache des Experimentes. Das Allgemeingesetz besagt, dass die Änderung eines einen stromlosen, aber geschlossenen Leiterkreis durchsetzenden Wirbelfeldes in dem Kreise Ströme hervorruft. Ist die Änderung die Ursache des Entstehens an sich, so muss zweifellos die Grösse der Änderung auf die Menge des Entstandenen einen sehr gewichtigen Einfluss äussern. Die Stärke des induzirten Stromes wird in jedem Augenblick in einer bestimmten Grössenbeziehung zu dem jeweiligen Änderungsgrad der gesammten Feldstärke stehen, sodass der zeitliche Verlauf der quantitativen Werte des induzirenden Feldes in allen seinen Schwankungen zum Vorbild für den zeitlichen Verlauf der Stromstärke dient. Faraday und die ihm Nachfolgenden haben durch ihre praktischen Untersuchungen die Richtigkeit dieser Schlüsse dargethan. Faradays Messresultate



bezogen sich jedoch auf die zwischen dem Änderungsbetrag der gesammten Feldstärke und der induzirten Spannung bestehenden Gleichsetzung. Insofern die induzirte Spannung nur von der Grösse des induzirenden Einflusses, die induzirte Stromstärke jedoch ausserdem von der Grösse des Stromkreiswiderstandes abhängig ist, versteht sich die Bevorzugung der Spannung für die Behandlung von Induktionsproblemen ganz von selbst. Sie soll auch in den folgenden Entwicklungen zur Geltung gelangen.

Wird die Aufgabe der Feldstärkeänderung mehr ins Einzelne verfolgt, so zeigt sich, dass zwei Faktoren auf die Grösse der Änderung bestimmend einwirken. Der eine ist die Schnelligkeit, mit der sich die Änderung in dem ins Auge gefassten Zeitpunkt vollzieht und der andere enthält die quantitativen Verhältnisse des der Änderung unterliegenden Wirbelfeldbestandteiles. Bei dem Vorgang der Induktion durch Bewegung, muss dementsprechend die Grösse der Feldstärkeänderung durch die Geschwindigkeit, mit der die an der Änderung sich beteiligenden Kraftlinien in dem fraglichen Zeitpunkt die Stromkreisfläche verlassen bezw. ausfüllen und durch die Anzahl und Grösse der Zugspannungen dieser Kraftlinien bestimmt sein. In Hinwendung zum Vorgang der Induktion durch Wechselströme zerlegen sich die, die Grösse der Feldstärkeänderung bestimmenden Faktoren in das Maass, in dem die Elektrizitätswirbel der Stromkreisfläche in dem herausgegriffenen Zeitpunkt ihre Rotationsgeschwindigkeit vergrössern bezw. verkleinern und in die Anzahl dieser Wirbel. Da die Prozedur der Änderung des induzirenden Feldes in allen Fällen auf eine Änderung des gesammten, ziffernmässigen Wertes der vorhandenen Zugspannungen hinausläuft, und dieser seinen Ausdruck in einer bestimmten Anzahl Dynen findet, so ist die Änderung selbst eine Grösse, die ihren Maassstab zum Messen ebenfalls in der Dyne besitzt. Diese Maasseinheit wird durch den verschiedenen Charakter der die Grösse der Änderung bestimmenden Faktoren nicht in Frage gestellt, denn die quantitativen Verhältnisse des der Änderung unterliegenden Wirbelfeldbestandteiles verlangen sowieso das Dynenmaass und bezüglich der Schnelligkeit, mit der sich die Änderung in dem ins Auge gefassten Zeitpunkt vollzieht, kann die Auffassung platzgreifen, dass sie lediglich die Bedeutung einer unbenannten Zahl besitzt,



welche die aus den quantitativen Verhältnissen hervorgehende Dynenmenge entsprechend vermehrt.

Das Endresultat, welches sich aus den Faradayschen Untersuchungen über die zwischen der Spannung und der Feldänderung vorhandenen quantitativen Beziehungen ergibt, ist von der Form einer Proportion, besitzt also nicht die wertvolle Bedeutung einer absoluten Messung. Es besagt, dass die in verschiedenen Zeitpunkten induzirten Spannungen in demselben Grössenverhältniss stehen, wie die in diesen Zeitpunkten angestrebten Feldänderungen, dass also eine vollkommene Proportionalität zwischen Ursache und Wirkung vorhanden ist. Eine auf das doppelte angewachsene Feldänderung muss demgemäss auch eine auf das Zweifache erhöhte Spannung induziren; oder umgekehrt, eine doppelt so grosse Spannung setzt eine auf das Zweifache gesteigerte Feldänderung voraus.

Die Proportionalität zwischen zusammengehörenden Feldänderungen und Spannungen legt die Vermutung nahe, dass sich dieselbe auch auf sämmtliche Faktoren ausdehnt, welche an der Änderung beteiligt sind, also z. B. auf die Anzahl und Feldstärke der Kraftlinien oder auf die Geschwindigkeit der Änderung. Die Experimente Faradays und seiner Nachahmer haben die Richtigkeit dieses Gedankens ausser allem Zweifel gestellt; sie haben auch eine Proportionalität zwischen Faktoren und Spannungen ergeben. Wie die gewonnenen Resultate praktisch verwertbar sind, zeigen die noch kommenden Entwicklungen; hier sei nur soviel vorweggenommen, dass aus ihnen das grundlegende Material für die Vorausberechnung elektrischer Maschinen geschaffen wird.

Obgleich sich die angestrebten Feldänderungen meistens nur auf Zeitpunkte erstrecken, ist es doch im Interesse der die Grösse der Änderung mitbestimmenden Schnelligkeit nicht zu umgehen, diese Änderungen auf messbare Zeitabschnitte wenigstens ausgedehnt zu denken. Der Vorgang der Feldänderung besteht nunmehr nicht darin, dass sich die die Änderung ausmachenden Faktoren lediglich innerhalb eines Zeitpunktes gewissermassen markiren, sondern darin, dass sie mit ihren dem Zeitpunkt entsprechenden Werten eine bestimmte Zeit hindurch in Thätigkeit treten und zwar in unveränderlicher Stärke. Sollen

die auf diese Weise erhaltenen Feldänderungsbeträge ebenfalls vergleichbar sein, so müssen sie gleichen Zeitabschnitten entsprechen. Wenn schon hinsichtlich der Auswahl eines Normalzeitabschnittes keine Grenzen gezogen sind, empfiehlt sich doch, im Interesse der Einfachheit und des Hergebrachten, der Zeiteinheit Sekunde den Vorzug zu geben. Was demnach im Faradayschen Proportionsgesetz zukünftig in Beziehung gesetzt wird, sind wiederum die in den verschiedenen Zeitpunkten angestrebten, jedoch auf eine Sekunde ausgedehnt gedachten Feldänderungen und die diesen Zeitpunkten angehörenden induzirten Spannungen. Ein Naturgesetz, das sich in die Form einer Proportion kleidet, hat den Vorzug, nur einer einzigen, experimentellen Grössenbestimmung gleichwertiger Mengen zu bedürfen. Alle anderen zahlenmässigen Feststellungen können, mit Hülfe der erhaltenen Grösse, auf rein rechnerischem Wege erfolgen. Im Interesse der möglichst sparsamen Rechnungshandhabung sind die experimentellen Resultate so zu verwenden, dass dem Zahlenvergleich auf der einen Seite die Einheitsmenge zu Grunde liegt. Die Aufgabe, das Faradaysche Gesetz praktisch brauchbar zu gestalten, gipfelt demnach in der exakten Ermittlung derjenigen, auf eine Sekunde ausgedehnten Feldänderung, welche im Stande ist, die Spannungseinheit Volt zu induziren. An dieser Stelle ist es am Platze, auf eine auf Seite 27 angeführte Bemerkung zurückzugreifen. Dort heisst es, dass zur Ermittlung der Spannungseinheit die Wirkung eines Magneten auf einen bewegten Stromkreis, also mit andern Worten, die Erscheinung der Induktion dienstbar gemacht wurde. Damit ist aber angedeutet, dass die Induktionsursache, also die Feldänderung, der Spannungseinheit als Vergleichsmaassstab dienen musste, und dass das dem Volt gleichwertige Änderungsquantum nicht experimentell ergründet zu werden brauchte, sondern beliebig gross angenommen werden konnte. Die Aufgabe des Vergleichens war demnach auf sehr einfache Weise gelöst worden. Der Elektrotechniker hat sein Augenmerk darauf zu richten, dass die Vergleichsziffern in seinen zu schaffenden Einrichtungen verwertbar werden. Da es sich dabei auch um die Darstellung einer in einer bestimmten Anzahl Dynen ausgedrückten Feldänderung handelt, stösst er jedoch auf grosse Schwierigkeiten. Dieselben bestehen z. B. bei der Induktion

durch Bewegung darin, dass ausser der Bewegungsgeschwindigkeit auch die Anzahl und die Feldstärke der an der Änderung beteiligten Kraftlinien in Frage kommen. Wie aber schon auf Seite 79 und 80, gelegentlich der Schilderung der Maassmittel für ausgedehnte Wirbelfelder, erörtert wurde, ist das Zusammenzählen der einzelnen Feldkraftlinien und das Bestimmen der Zugspannungen ihrer Wirbel vorläufig noch unmöglich. Aus diesem Grunde sind der Absicht, die Feldänderung in Dynen zu messen, Schranken gesetzt. Dort wie hier besteht die Notwendigkeit, sich auf Felder ganz bestimmter Art, und zwar auf Ringfelder zu beschränken, um überhaupt in den Besitz eines Maassmittels und zum Ausmessen kommen zu können. Nicht die Dyne, sondern das Dynqcm bildet die Einheit, womit die Feldänderung auszumessen ist und nicht jedes Feld, sondern nur Ringfelder sind für das Dynqcm zugänglich. Knüpfen sich die induzirenden Änderungen an Ringfelder, dann sind, ausser der Bewegungsgeschwindigkeit, nur die mittlere Feldstärke und die sich beteiligende Querschnittsfläche in ihrer Grösse festzulegen, um alle quantitativen Einblicke in den Induktionsvorgang zahlenmässig zu ermöglichen. Für diese Aufgabe reicht der derzeitige Kenntnissstand vollkommen aus. Daraus folgt aber, dass eine beabsichtigte experimentelle Darstellung der Volteinheit nur durch Zuhilfenahme eines Ringfeldes geschehen kann, dessen Änderungsbetrag durch das Dynqcm gemessen wird. Es ist allgemein üblich geworden, einer induzirten Spannung dann die Grösse eines Volts beizulegen, wenn die in dem betreffenden Zeitpunkt vorsichgehende Feldänderung von solcher Art ist, dass sie in ihrer sekundlich gedachten Ausdehnung 100 Millionen Dynqcm ergibt. An Stelle der Zahl 100 Millionen ist es einfacher, die entsprechende Potenz der Grundzahl 10 zu setzen. Damit lässt sich das Übereinkommen kurz dahin aussprechen:

1 Volt ist 10^8 Dynqcm gleichwertig.

Soll also ein Volt auf dem Versuchswege erzeugt werden, so sind die an der Änderung beteiligten Faktoren dergestalt in Thätigkeit zu bringen, dass sie in ihrer sekundlich gleichmässigen Gesammtwirkung aufs genauste 10^8 Dynqcm ausmachen. Bei dem proportionellen Charakter des Faradayschen Quantitätsgesetzes genügt, wie bereits bemerkt, dieses eine Zahlenverhält-

niss zwischen Spannung und Änderung, um beliebige andere Verhältnisse rechnerisch bewältigen zu können. Die mathematische Operation, welche an der Proportion vorzunehmen ist, um ihr eine praktisch brauchbare Form zu geben, besteht lediglich in der Umstellung ihrer Glieder. Mit Vollzug derselben zeigt sich, dass die Teilung einer induzirenden Feldänderung durch 10^8 genügt, um die zugehörenden induzirten Volts festzustellen. Die Gleichsetzung, welche sich ergibt, besitzt die Form:

$$\text{Induzirte Volts} = \frac{\text{Induzirende sekundliche Änderung}}{10^8}.$$

Wird der bestimmte Fall der Anwendung eines elektromagnetischen Feldes, als induzirendes Organ, vorausgesetzt, so lässt sich die Gleichsetzung auch in der abgekürzten Form

$$E = \frac{\mathfrak{B} \times q}{10^8} \;\ldots\ldots\; \text{Volts}$$

wiedergeben.

Im Hinblick auf die bisher gewonnenen Einsichten, wird Niemand in Abrede stellen wollen, dass die quantitativen Teile der Induktionslehre nach der Seite ihrer Verwendbarkeit zur Zeit noch recht spärlich ausstaffirt sind. Jedoch wird dadurch mehr die hohe Wissenschaft, als die Technik in Mitleidenschaft gezogen. Letztere richtete beim Aufbau ihrer, der Induktion das Dasein verdankenden maschinellen Einrichtungen das Hauptstreben auf weitgehendste Sparsamkeit hinsichtlich Rauminanspruchnahme. Das Ringfeld wusste sich gerade dieser Forderung aufs beste anzuschmiegen. Die das Ringfeld hervorbringende und noch dazu mit einem Eisenkern ausgefüllte Leiterspirale ist ein quantitativ sehr ergiebiges Gebilde, trotzdem sie sehr wenig Platz benötigt. Die Praxis errichtete hunderterlei, den verschiedensten Zwecken gerecht werdende Apparatformen auf den Prinzipien der Induktion und fand stets an dem Ringfeld ihr Genügen. Die Entwicklungsgeschichte der Elektrotechnik zeigt übrigens, dass die grossen Vorzüge dieses Wirbelfeldes bereits zu einer Zeit Anerkennung fanden, in der die zahlenmässige Beherrschung der quantitativen Verhältnisse von Ringfeldern einstweilen noch zu den der Zukunft vorbehaltenen Problemen gehörte.

Nachdem mit den obigen Darlegungen die Gewinnung eines Gesammteinblickes in das Wesen der Induktion, sowie die Kenn-

zeichnung des allgemeinen Induktionsgesetzes, nach der qualitativen und quantitativen Seite, angestrebt wurden, ist es Gegenstand des Nachfolgenden, zu zeigen, wie diese Verallgemeinerungen in den Rahmen der praktischen Anwendung passen. Ohne Zweifel werden die Verallgemeinerungen für jeden besonderen Fall der Nutzbarmachung ein bestimmtes Gepräge erhalten. Da es sehr viele experimentelle Möglichkeiten zur Hervorbringung von Induktionserscheinungen gibt, so erhellt daraus, dass das Gebiet der Induktionslehre hinsichtlich der Zahl der Spezialfälle sehr ausdehnungsfähig ist. Für die moderne Elektrotechnik wurden allerdings nur zwei Arten der Induktionserzeugung von fundamentaler Wichtigkeit, und zwar die aus blosser Bewegung und die aus Wechselströmen; beide Mal lediglich unter Zuhilfenahme elektromagnetischer Ringfelder. Die eine wurde die Veranlassung zur Erbauung der Dynamomaschine; die andere schuf den Wechselstromumformer. Es genügt für die Zwecke des vorliegenden Werkchens, sich nur mit diesen zwei Arten der Strominduzirung zu beschäftigen; und zwar nicht eingehender, als zur Hervorhebung des Charakteristischen notwendig ist. Ein jedes Mehr ist Sache derjenigen literarischen Erzeugnisse, welche die einschlägigen technischen Einrichtungen in ihrem Wesen und in ihrer Bedeutung schildern.

Die zeichnerischen Gebilde, an die sich die folgenden Betrachtungen knüpfen, sind trotz ihrer schematischen und primitiven Form zulänglich genug, um das Wesentliche zu erkennen und dem weiterstrebenden Leser ein selbstständiges Kombiniren zu gestatten. Die Abbildung Fig. 42 zeigt das Schema für die Induktionsart durch Bewegung bei Benutzung eines elektromagnetischen Ringfeldes als induzirendes Organ. Die das Wirbelfeld erzeugende Leiterspirale, die eiserne Ringfeldbahn und der Luftspalt sind, sowohl in der Draufsicht als auch in dem Schnitt, ohne weiteres als solche erkenntlich. Besondere Erwähnung verdient nur der im Luftspalt vorhandene Bestandteil. Es ist ein um die Achse C D drehbarer Drahtrahmen, in welchem die Induktionsströme hervorgerufen werden. Durch diese Art der Anordnung ist ein höchst einfaches Mittel zur Hervorbringung andauernd induzirender Bewegungen, also auch von Dauerströmen, geschaffen, ohne dass das Luftfeld eine nennenswerte Querschnitts-

ausdehnung erhalten muss. Damit die Fläche des rotirenden Drahtrahmens den Spaltraum möglichst vollständig ausnützen kann, ist die Drehachse senkrecht zu der Papierfläche, also senkrecht zu den Kraftlinien und ihren Ebenen anzuordnen. Der Drahtrahmen sitzt auf einem massiven Eisencylinder, der den

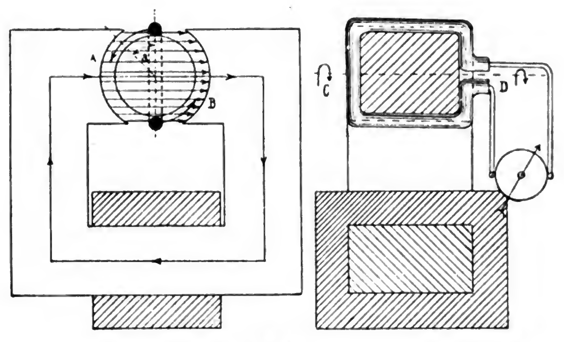


Fig 42.

Zweck hat, den lufterfüllten Raum des Ringfeldes zu verringern und damit die zur Erzielung einer bestimmten Querschnittsfeldstärke erforderlichen Ampèrewindungen herabzudrücken. Leider ist es nicht zu umgehen, diesen Teil mitrotiren zu lassen. Dieser Umstand ist die Veranlassung zur Beeinträchtigung des Wirkungsgrades, insofern die Moleküle des Cylinders während der Dauer der Rotation einem Drehzwang unterliegen, und dieser, gemäss den Entwicklungen auf Seite 91, den Hysteresisverlust hervorbringt. Um die Strombildungen wahrnehmen und messen zu können, ist der Rahmen an einer Seite geöffnet und durch Verbindungsleitungen mit einem geeigneten Instrument in Zusammenhang gebracht.

Wird der Drahtrahmen in Rotation versetzt und ist ein Luftspaltfeld vorhanden, so ergibt dieses an der Hand der obigen Anordnung in Wirklichkeit durchgeführte Experiment einen dauernden Ausschlag des Instrumentes, mithin einen Dauerstrom von induktionellem Charakter. Bei genauer Verfolgung des

Vorganges und bei entsprechender Berücksichtigung des allgemeinen Entstehungsgesetzes ist es leicht, sich die Ursache dieser Strombildung klarzumachen. Bei der ersten Viertelsumdrehung, also bei der Drehung aus der Vertikalen in die horizontale Lage, wird die die Rahmenfläche durchsetzende Kraftlinienzahl fortwährend kleiner und erreicht den Betrag Null, wenn der Rahmen die horizontale Lage angenommen hat. Bei der zweiten Viertelsumdrehung, wobei der Rahmen wieder in die vertikale Lage gelangt, nehmen die durchsetzenden Kraftlinien an Anzahl stetig zu und werden in der Vertikalstellung am zahlreichsten. Die nächstfolgenden zwei Viertelsumdrehungen bieten hinsichtlich der Anzahländerung nichts Neues; das einzig Erwähnenswerte ist, dass die Drahtrahmenhälften mit ihren zu durchstreichenden Spalträumen abwechseln. Mit der Vollendung einer ganzen Umdrehung haben alle die Induktion und ihren Charakter bestimmenden Einflüsse ihre Wirkungen kundgegeben; weitere Umdrehungen verursachen lediglich Wiederholungen der eben geschilderten Vorgänge. Durch die in der Fig. 42 gekennzeichneten Art der Rahmenanordnung ist demnach die Möglichkeit gegeben, in einer Leiterkreisfläche beliebig lang anhaltende Anzahländerungen der durchsetzenden Kraftlinien hervorzubringen. Da aber nach dem allgemeinen Erfahrungsgesetz der Induktion derartige Änderungen die Veranlassung zum Auftreten von Induktionsspannungen bezw. Strömen bieten, so sind hiemit die Ursachen der experimentell festgestellten Strombildung vollkommen dargelegt.

Insofern die induzirten Spannungen ihre Angriffspunkte auf die Elektrizität höchstwahrscheinlich lediglich in den wagrechten Bestandteilen des Drahtrahmens liegen haben und diese bei der Drehung die Luftspaltkraftlinien schneiden, ist es verständlich, wie sich die heute noch Geltung habende Ansicht Bahn brechen konnte, dass das Schneiden der Kraftlinien das Bestimmende für die Entstehung von Induktionserscheinungen sei. Ursprünglich knüpfte man die Darstellung von Induktionsproblemen an keinen Drahtrahmen, sondern nur an einen Leiterstab an, welcher sich, in der in der Fig. 43 skizzirten Weise, in den übrigen Teil des Stromkreises einfügte. Bei dieser Gruppirung ist allerdings die Thatsache vorhanden, dass ein induzirter Strom nur dann von dem Instrument angezeigt wird, wenn der Stab eine solche

Bewegung in dem Luftspalt ausführt, dass er dabei Kraftlinien schneidet. Derartige Betrachtungen mussten natürlich die Ansicht von der Bedeutung des Kraftlinienschneidens verstärken. Von dem Standpunkt des Allgemeingesetzes aus sinkt jedoch diese Bedeutung zu der einer allerspeziellsten Regel herab, die man, im Interesse einer rationellen Induktionslehre, in dem Augen-

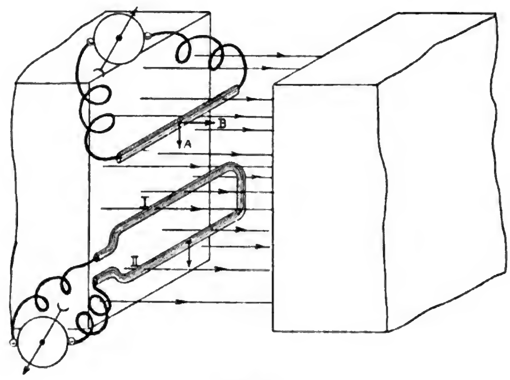


Fig. 43.

blick fallen lassen musste, in dem man die weittragende Bedeutung des Gesetzes der Anzahländerung erkennen lernte. Dieses letztere Gesetz erläutert die Wirkungen in dem bewegten Leiterstab in einer völlig unangreifbaren Form. Wird der Leiter in der Pfeilrichtung B, also parallel und in Folge dessen nichtschneidend zu den Kraftlinien bewegt, so erhält wohl die Stromkreisfläche eine andere Lage, aber an der Anzahl der durchsetzenden Kraftlinien ändert sich nichts. Eine Strombildung ist daher ausgeschlossen. In jeder anderen Bewegungsrichtung, also z. B. in der Pfeilrichtung A, die den Stab immer zum Schneiden mit den Kraftlinien bringt, ändert sich hingegen nicht nur die Flächenlage, sondern auch die Kraftlinienanzahl. In diesem Fall muss stets ein Induktionsstrom auftreten. Wie unzulänglich die Auffassung der Induktionsprobleme vom Standpunkt des Kraftlinienschneidens ist, zeigt übrigens die zweite in der Fig. 43 skizzirte

Leiteranordnung. Es ist ein in der eingezeichneten Pfeilrichtung bewegter Drahtrahmen, dessen wagrechte Bestandteile die Kraftlinien zwar schneiden, dessen Messinstrument aber keine Spur von Strombildung wahrnehmen lässt. Das Allgemeingesetz hält auch in diesem Falle stich; nach ihm kann eine Induktionserscheinung nicht eintreten, weil durch die Bewegung keine Anzahländerung verursacht wird. Was auf der einen Seite an Kraftlinien austritt, tritt an der anderen Seite wieder ein.

Ist das in den beiden Figuren angedeutete Instrument von solcher Art, dass es nicht nur die Ströme in ihrer Stärke, sondern auch in ihrer Fliessrichtung zu bestimmen gestattet, so lässt sich nachweisen, dass ein Wechsel in der Bewegungsrichtung der Rahmenhälften, das ist beim Passiren der Vertikalebene, stets mit einem Stromrichtungswechsel verknüpft ist. Eingehendere, experimentelle Untersuchungen über diesen Teil der Induktionserscheinungen zeigen ausserdem, dass auch die Richtung der Kraftlinien auf die Stromrichtung von Einfluss ist. Etwas Unerwartetes ist mit diesen Erfahrungsresultaten nicht gewonnen; denn es ist doch naheliegend, dass die speziellen Eigenschaften, wie Stärke und Richtung, der die Induktion verursachenden physikalischen Grössen etwas Ähnliches bei dem erzeugten Strom beeinflussen müssen. Alles was sich an Thatsächlichkeiten über die Richtungsbeziehungen von Kraftlinien, Bewegung und Strom feststellen lässt, kann seinen Ausdruck in einer Gedächtnissregel finden. Solcher Regeln kennt man verschiedene; eine sehr einfache, die sich dem allgemeinen Entstehungsgesetz der Induktion anpasst, ist folgende: *Sieht das Auge der Kraftlinienrichtung entlang, nach der Drahtrahmenfläche, so fliesst ein Strom in dem Uhrzeigersinn, wenn durch die Bewegung eine Abnahme der durchsetzenden Kraftlinien eintritt; hingegen entgegen demselben, wenn durch die Bewegung eine Zunahme der Kraftlinienzahl stattfindet.* Eine zweite Richtungsregel, die sich mehr dem in Fig. 42 angedeuteten Spezialfall anlehnt, ist bereits auf Seite 107 angeführt worden. Dort diente die linke Hand als Hülfsmittel; hier kommt die *rechte* zur Geltung. Unter Benutzung der Fig. 44 und der früheren Regel ist die Art der Handhabung dieser neuen Regel auch ohne Formulirung ohne

weiteres möglich. Um sich die hier angeführten Gedächtnissätze fest einzuprägen, ist es gut, die Figuren 42 und 43 recht eingehend als Übungsgegenstände zu benutzen.

Nicht minder wichtig als die qualitativen Eigenschaften des Grundschemas der Induktion durch Bewegung sind die quantitativen. Sie sollen ebenfalls eine zwar kurze, aber deswegen doch möglichst prägnante Beleuchtung erfahren.

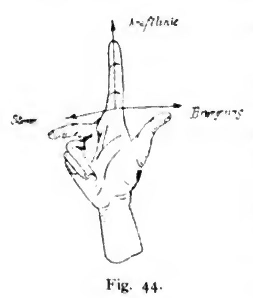


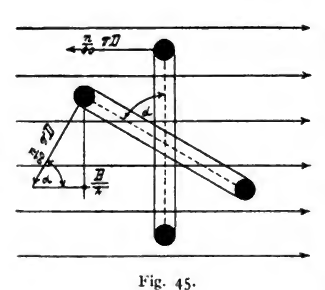
Fig. 44.

Damit, dass das Messinstrument der Fig. 42 in jeder Rahmenlage Strom anzeigt, ist auch der Beweis erbracht, dass in jeder derselben eine Induktionsspannung vorhanden ist. Die Quintessenz der ganzen quantitativen Untersuchungen besteht darin, sich über die Grösse dieser Spannungen ins Klare zu kommen. Es ist dabei von ebenso grossem Interesse, die während einer Umdrehung möglichen Spannungswerte in ihren absoluten Beträgen festzustellen, wie sie untereinander zu vergleichen. Das Endergebniss der im Eingang dieses Abschnittes angestellten Betrachtungen war die Gleichsetzung $E = \frac{\mathfrak{B} \times q}{10^8}$, worin $\mathfrak{B} \times q$ die spezielle Bedeutung einer induzirenden sekundlichen Feldänderung besass. Diese Gleichsetzung hat für jede der Spannungen Gültigkeit; sie gestattet jedoch in dieser allgemeinen Form nur schwer eine Anwendung und ist daher zweckentsprechend umzuformen. Von dieser Umformung bleibt die elektromagnetische Feldstärke $\mathfrak{B}$ unberührt und zwar deshalb, weil ihre Ersetzung durch einen gleichwertigen, andersartigen Ausdruck für die Erleichterung der Rechnungshandhabung und für die Hervorhebung des Wesentlichen vollkommen belanglos ist. Obendrein stellt $\mathfrak{B}$ in der Ringfeldänderung, was wohl zu beachten ist, einen konstanten Faktor vor, der bei allen Rahmenlagen sich im gleichen Maasse an der Spannungserzeugung beteiligt. Anders liegen die Verhältnisse hinsichtlich der Querschnittsfläche q, welche bei dem Grundschema der Induktion durch Bewegung den veränderlichen Faktor



verkörpert und den äquivalenten Ausdruck für die in der Zeiteinheit aus- bezw. eingetretenen Kraftlinien darstellt. Die Ermittelung dieser Querschnittsfläche darf nicht mit der Aufsuchung jener Fläche verwechselt werden, die von dem Rahmen in Folge der Drehung umkreist wird. Was hier in Frage kommt, sind blos gedachte Flächen und zwar solche, welche in den verschiedenen Rahmenlagen erhalten würden, wenn der diesen Lagen entsprechende Änderungscharakter eine Sekunde hindurch in unveränderter Form aufrechtzuerhalten wäre. Diese Flächen werden stets, in Übereinstimmung mit der Rahmenform, die geometrische Gestalt eines Rechteckes besitzen; ihr Inhalt ist demzufolge das Produkt aus den zwei Faktoren Länge und Breite. Wie bereits auf Seite 118 hervorgehoben, sind an der quantitativen Ausgestaltung der Induktionsspannungen unter anderm die Geschwindigkeit, mit der die Kraftlinien die Stromkreisfläche in dem fraglichen Zeitpunkt verlassen bezw. ausfüllen und ihre Anzahl beteiligt. Bezüglich der Anzahl ist unmittelbar ersichtlich, dass sie der Längenausdehnung des Rechteckes, oder, was in dem vorliegenden Fall dasselbe besagt, der Drahtrahmenlänge gleichwertig ist. Dieser Flächenfaktor bildet in dem Grundschema eine konstante, also für alle Rahmenlagen gültige Grösse. Sie werde in der Folge durch das lateinische L abgekürzt bezeichnet. Der veränderliche Faktor reduzirt sich somit auf die Breitenausdehnung des Rechteckes, welcher die eben angeführte Geschwindigkeit des Aus- bezw. Eintretens der Kraftlinien ohne Zweifel entspricht. Wäre diese Geschwindigkeit mit der Umfangsgeschwindigkeit des rotirenden Rahmens völlig identisch, so müssten die den einzelnen Lagen entsprechenden Induktionsspannungen untereinander gleich sein. Diese Gleichheit ist allerdings nur bei der für das Grundschema gemachten Voraussetzung richtig, dass die Umfangsgeschwindigkeit in allen Lagen dieselbe bleibt, was sich durch ein gleichförmiges Drehen des Rahmens erzielen lässt. Die Umfangsgeschwindigkeit gibt, wie nebenbei bemerkt sein mag, ein ziffernmässiges Bild von der Schnelligkeit, mit welcher die Längsteile des Rahmens die Kraftlinien durchschneiden. Eine Bestätigung des Gleichseins der einzelnen Induktionsspannungen liefert das Experiment nicht; im Gegenteil zeigt dieses, dass grosse Verschiedenheiten auftreten.

Die Umfangsgeschwindigkeit kann demnach nicht allein an der Bildung der Breitengrösse beteiligt sein; sie muss noch mit einem zweiten und zwar variabeln Element in Verbindung stehen. Wie die Erfahrung und die Überlegung lehrt, ist dieses Element in der *Richtung* der Umfangsgeschwindigkeit enthalten. Die Richtung entpuppt sich somit als der einzige, auf die Erzeugung von Induktionswirkungen veränderlich einwirkende Bestandteil. Da zu jeder Rahmenlage eine andere Richtung gehört, so lässt sich für das Grundschema die bedeutsame Erkenntniss ableiten, *dass beim Drehen ein fortwährender Wechsel in der Quantität der Induktionsspannung eintritt.* In welcher Weise aus der konstanten Umfangsgeschwindigkeit und ihrer Richtung die zugehörende, angestrebte Feldbreite ermittelt wird, lässt sich am besten aus der Darstellung der Fig. 45 entnehmen. Sie enthält das vergrösserte Bild des Luftspaltes und des Rahmens, den letzteren in zwei verschiedenen Lagen. Die mit Pfeilen ausgerüsteten Linien repräsentiren die Umfangsgeschwindigkeit und zwar nach Grösse und Richtung. Die Längen dieser Linien stellen denjenigen Umfangsteil des Rotationscylinders dar, welcher von dem Rahmen innerhalb einer Sekunde umschrieben wird. Erhält die Rahmenbreite mit dem Buchstaben D ihre abgekürzte Bezeichnungsweise, so ist der gesammte Cylinderumfang gleich


Fig. 45.

π D und dieser Umfang wird innerhalb einer Sekunde $\frac{n}{60}$[1] mal von dem Rahmen zurückgelegt. $\frac{n}{60}\pi$ D ist daher der numerisch gleiche Ausdruck für den Cylinderumfangsteil, also auch für die Umfangsgeschwindigkeit. Dieses Maass ist in der Fig. 45

1) Es ist im Maschinenbau und auch in der Elektrotechnik bei rotirenden Mechanismen gäng und gäbe geworden, die minutliche Umdrehungszahl als Vergleichsmaassstab zu benutzen. Sie wird mit dem Buchstaben n abgekürzt bezeichnet.

eingetragen. Der Winkel α zwischen der senkrechten und der schrägen Rahmenlage enthält in seiner Grösse ein vollkommen zulängliches Mittel zur ziffernmässigen Festlegung der Richtungsabweichung von der Ausgangslage. Zufolge dem der Geometrie entlehnten Satz, dass Winkel, deren Schenkel paarweise auf einander senkrecht stehen, gleichgross sind, ergibt sich für den aus der Geschwindigkeitslinie und einer horizontalen Geraden gebildeten Winkel ebenfalls der Wert α. Die Horizontale schneidet eine vom Angriffspunkt der Linie $\frac{n}{60} \pi D$ nach abwärts gezogene senkrechte Linie in einem Punkte, der die untere Abgrenzung für eine in ihrer Bedeutung leicht erkenntliche Länge darstellt. Diese Länge ist, wie ein Blick auf die Fig. 45 belehrt, das geometrische Maass für die von der oberen Rahmenhälfte während einer Sekunde angestrebten Feldbreite. Wird die von dem ganzen Rahmen erreichbare Feldbreite mit dem Buchstaben B bezeichnet, so ist der numerische Ausdruck für die obige Länge $\frac{B}{2}$. Die Geschwindigkeitslinie, die Horizontale und die Vertikale bilden zusammen ein rechtwinkliges Dreieck. Dieser Umstand ermöglicht, gemäss den Lehren der Geometrie, die Aufstellung einer sehr einfachen Beziehung zwischen den Grössen α, $\frac{n}{60} \pi D$ und $\frac{B}{2}$. Es ist nämlich $\frac{B}{2} = \sin \alpha \times \frac{n}{60} \pi D$ oder auch $B = \sin \alpha \frac{n}{30} \pi D$. Diese Gleichsetzung ergibt für die Feldbreite eine Beziehung, welche aus durchweg leicht feststellbaren Bestandteilen zusammengesetzt ist und die demnach eine ebenso leichte Ermittelung der Feldbreite selbst gewährleisten. Der Einfluss der Rahmenlage ist in der obigen Gleichsetzung durch den Sinus des Richtungswinkels gekennzeichnet. Dieser Sinus bildet einen Zahlenfaktor, der im Interesse der grösseren Klarheit am besten durch die Bezeichnung Lagenfaktor vertreten wird. Mit der Herausschälung der an der angestrebten Feldänderung beteiligten verschiedenen Einflüsse und ihres rechnungsmässigen Zusammenhanges ist Alles geschaffen, um die Erscheinungen der Induktion durch Bewegung auch nach ihrer quantitativen Seite nutzbringend verwerten zu können.

Die Gleichsetzung $E = \frac{\mathfrak{B} \times q}{10^8}$ erhält nach Vornahme einiger Ersetzungen, Umstellungen und Kürzungen die folgende, für das Grundschema typische Form:

$$E = \text{Lagenfaktor} \times \frac{\pi}{30 \times 10^8} \times n \times \text{Rahmenfläche} \times \mathfrak{B} \ldots \text{Volts.}$$

Der Lagenfaktor ist hierin das einzig veränderliche Glied; alles Übrige bildet unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Versuchsanordnung eine konstante Grösse.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde von der Annahme ausgegangen, dass das Luftspaltfeld ein vollkommen gleichförmiges Feld sei, also ein solches, bei welchem gleichgrosse und gleichschnelle Wirbel in gleicher Dichte nebeneinander liegen. Für eine derartige Feldanordnung ist der Lagenfaktor durch den sin α voll und ganz vertreten. Die während des Drehens nacheinander auftretenden Induktionsspannungen bilden aber dann die Phasen einer regelrechten Sinuswelle, deren Nullpunkt der Vertikallage und deren grösste Phase der Horizontallage des Rahmens entspricht. Die oberhalb der Zeitlinie (Siehe S. 17) liegenden Phasen werden während der ersten, in der Vertikallage beginnenden halben Umdrehung induzirt, die unterhalb liegenden während der zweiten halben Umdrehung. Dass der Vertikallage keine Induktionswirkung entspricht, geht ohne weiteres aus dem Umstand hervor, dass in dieser Stellung die Richtung der Umfangsgeschwindigkeit parallel zu der Kraftlinie ist. Die Feldbreite kommt daher gar nicht zur Entfaltung und somit auch keine Induktionsspannung. In der Horizontallage ist die Richtung der Umfangsgeschwindigkeit senkrecht zu den Kraftlinien. Die angestrebte Feldbreite erreicht damit ihre grösstmögliche Ausdehnung, und infolgedessen die Sinuskurve ihre grösste Phase. Übrigens können die eben genannten Sonderfälle von dem des mathematischen Lesens Kundigen ohne weiteres aus der spezialisirten Gleichsetzung der Induktionsspannung entnommen werden. In der Vertikallage ist der Richtungswinkel α Null, daher auch sin α und E Null. In der Horizontallage ist $\alpha = 90^0$, daher sin α und E ein Maximum.

Wer die Entwickelungen auf Seite 79 und flgd. über die Berechnung ausgedehnter, elektrischer Ringfelder aufmerksam



verfolgte, musste zu der Erkenntniss gelangen, dass die Annahme eines gleichförmigen Feldes nur aufgegriffen wurde, um das Problem der Feldmessung zu bewältigen. Dass diese Gleichförmigkeit keine Gültigkeit mehr haben kann, wenn es sich um die Ermittelung einzelner Lagenwirkungen handelt, geht aus dem früher Gesagten mit zwingender Notwendigkeit hervor. Der Lagenfaktor umfasst daher in Wirklichkeit nicht nur den sin α, sondern auch den Einfluss der thatsächlichen Gestalt des Luftspaltfeldes. Wenn er bei elektromagnetischen Feldern, wie die Erfahrung zeigt, dem sin α doch sehr nahe kommt, so hat dies seinen Grund in dem die Ungleichheiten der Einzelfeldstärken verwischenden Charakter des magnetisirten Eisenkernes. Immerhin ist es am Platze, mit der Annahme des Vorhandenseins vollkommen reiner Sinuswirkungen sehr vorsichtig zu Werk zu gehen; sonst könnte die Wirklichkeit der Theorie auch hierin und wie in so Vielem, einen Possen spielen.

Wie sich der obige mathematische Ausdruck für die Induktionsspannung praktisch verwenden lässt, werde an der Lösung der nachstehend formulirten Aufgabe gekennzeichnet.

Aufgabe. Der Drahtrahmen des Grundschemas besitze eine Länge von 30 cm und eine Breite von 20 cm. Seine Drehung vollziehe sich gleichförmig und mit einer derartigen Geschwindigkeit, dass er innerhalb einer Minute 1000 Touren zurücklegt. In dem Luftspalt sei eine elektromagnetische Feldstärke von 10000 Dynen vorhanden. Wie gross ist die effektive Spannung des von dem Rahmen induzirten Wechselstromes, welcher Sinusform besitzen möge?

Lösung. Gemäss dem auf Seite 20 Angeführten ist bei Sinuswellen die effektive Phase gleich 0,707 der maximalen. Die maximale Phase der Spannung besitzt den Lagenfaktor sin 90^0, welcher bekanntlich Eins ist. Mit diesen zwei Erläuterungen und den in der Aufgabe gegebenen Daten sind sämmtliche Unterlagen zur ziffernmässigen Ermittelung der effektiven Spannung geschaffen. Die Gleichsetzung lautet:

$$E_{eff} = 0{,}707 \times \frac{\pi}{30 \times 10^8} \times 1000 \times 30 \times 20 \times 10\,000.$$

Eine Ausrechnung ergibt für die Grösse der effektiven Spannung den Betrag von 4,44 Volt.

Zur Erzielung recht hoher Spannungsbeträge sind die Tourenzahl, die Rahmenfläche und die Feldstärke möglichst gross zu wählen. Aber selbst wenn in dieser Richtung Aussergewöhnliches geleistet wird, erreichen die Spannungen noch nicht jene Voltanzahl, welche die Elektrotechnik in ihren maschinellen Einrichtungen zu erzielen in der Lage ist. Es muss ohne Zweifel noch ein weiteres und zwar ungewöhnlich ergiebiges Mittel zur Vermehrung der Volts existiren. Das ist denn auch der Fall und zwar besteht dieses Mittel darin, dass auf dem Eisencylinder nicht nur ein Drahtrahmen, sondern möglichst viele angeordnet werden. In jedem dieser Rahmen entsteht beim Drehen eine Induktionsspannung; dadurch, dass die Rahmen unter sich und mit dem äusseren Stromkreis geeignet vereinigt werden, können diese Einzelspannungen in ihrer Summe Wirkungen ausüben. Ist die Verteilung der Rahmen auf dem Cylinderumfang eine völlig gleichartige, und ist ihre Anzahl so gross, dass ein Rahmen dicht an dem andern liegt, so repräsentirt die Summe der induzirten Spannungen einen sich nicht ändernden Voltbetrag. Die einzelnen Rahmen wechseln zwar jeden Augenblick ihre Lage, da sie aber damit nur an solche Stellen gelangen, wo sich die voraufrotirenden Rahmen kurz zuvor befanden, so werden durch die Änderung keine neuen Voltsummanden entstehen. Jedem Längenschnitt durch die Achse des von den Rahmen umschriebenen Luftspaltraumes entspricht eine ganz besondere und sich stets gleichbleibende Leistungsfähigkeit zum Hervorbringen von Strömen, welche alle ihn passirenden Leitergebilde mit derselben Voltgrösse ausstaffirt. Bei Kenntniss der einzelnen Spannungen, welche den Längenschnitten entsprechen, ist es ein Leichtes, auch die konstante Gesammtspannung in ihrer Grösse festzulegen. Die mathematische Operation des Zusammenzählens ist das Einzige, was durchzuführen ist. Ist der Mittelwert der Einzelspannungen bekannt, dann ist die Ausrechnung aller Volts noch einfacher, da diese aus der Vervielfachung dieses Mittelwertes mit der Rahmenanzahl resultiren. Unter der Annahme, dass Sinusströme in den Einzelrahmen erzeugt werden, ist das Feststellen des Mittelwertes verhältnissmässig leicht möglich. Auf Seite 21 wurde er mit 0,637 des [illegible]imalen angegeben. Der Maximalwert ist bekannt; wird

er mit 0.637 und der Anzahl der Rahmen (abgekürzte Bezeichnung Z) vervielfacht, so ergibt sich damit die für den Bau elektrischer Maschinen so überaus wichtige Gleichsetzung der konstanten Gesammtspannung zu:

$$E = \frac{1}{15 \times 10^8} \times n \times Z \times \text{Rahmenfläche} \times \mathfrak{B} \ldots \text{Volts.}$$

Das Bestreben der Elektrotechnik war in den Entwickelungsjahren darauf gerichtet, die maschinellen Stromerzeuger so zu bauen, dass diese konstante Gesammtkraft ungeschmälert nach aussen zur Wirkung gelangen konnte. Es führte zur Erfindung und Ausbildung des sogenannten Stromwenders. Es ist nicht Gegenstand des Buches, auf diesen Bestandteil der elektrischen Maschine näher einzugehen; immerhin sei noch soviel gesagt, dass er die Erzeugung von nahezu idealen Gleichströmen ermöglichte und zwar in Bezug auf die Ausnützungfähigkeit in der denkbar ökonomischsten Weise. Auch Wechselströme gestattet das in der Rahmenanzahl erweiterte Grundschema in den äussern Stromkreis abzugeben; dadurch, dass sich aber selbst im günstigsten Fall ein grosser Teil der Einzelspannungen fortwährend gegenwirken, ist der Vorteil der Rahmenvermehrung nur schlecht ausgenützt.

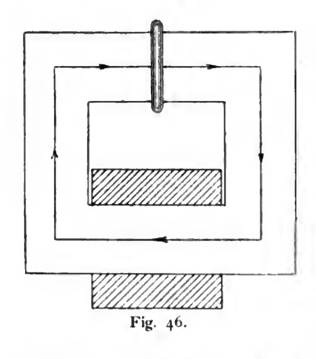


Fig. 46.

Nachdem die Induktionsart durch Bewegung in ihren belangreicheren Einzelheiten einer Kennzeichnung unterzogen wurde, ist der Vorgang der Induktionshervorbringung durch Wechselströme an einem analogen Grundschema zu zergliedern. Dieses Schema ist zeichnerisch durch die Fig. 46 dargestellt. Die wirbelerzeugende Leiterspirale und das Eisengestell sind von derselben Beschaffenheit wie in der Fig. 42. Nur entfällt der in jener Skizze vorhandene Luftspalt. Da der die Induktionsströme führende Drahtrahmen unbeweglich gelagert ist, ist der Luftspalt unnötig, und ausserdem gestattet sein Wegfall eine beträchtlich höhere

Ausnützung der magnetisirenden Ampèrewindungen. Um etwaige Strombildungen wahrnehmen zu können, ist der Rahmen an einer Stelle knapp geöffnet und mit einem Messinstrument in Verbindung gesetzt zu denken.

Wird die Leiterspirale von Wechselströmen durchflossen, so zeigt der in Wirklichkeit vorgenommene Versuch, dass in dem Drahtrahmen Induktionsströme auftreten, welche mit diesen Wechselströmen kommen und verschwinden. Da das allgemeine Entstehungsgesetz der Induktion unter anderm besagt, dass eine Wirbelgeschwindigkeitsänderung eine Strombildung zur Folge hat, so ist damit die äusserliche Ursache der an und für sich nicht vorauszusehenden Wirkung für den Nachdenkenden klargelegt. In erster Linie veranlasst der Strom in der Leiterspirale die Entstehung und Variirung des rein elektrischen Feldes. In zweiter Linie tritt dieses Feld in Aktion, indem es mit seiner Änderung fortwährende Eisenmoleküldrehungen und damit stets sich ändernde magnetische Feldstärkezusätze bewirkt. Das anhaltende Drehen der Eisenmoleküle bringt auch bei diesem Schema Hysteresisverluste mit sich. Da sich der Drehzwang auf das ganze Eisengestell erstreckt, müssen hier die Verluste quantitativ bedeutender als beim Schema der Fig. 42 sein. Dort dehnten sie sich lediglich auf den mitrotirenden Eisencylinder aus. Wird vorläufig von der Voraussetzung ausgegangen, dass die einzelnen Wechselstromwellen ähnliche Wellen bei der elektromagnetischen Querschnittsfeldstärke im Gefolge haben, so ist, im Nullstadium angefangen, der zeitliche Charakter der Änderung folgender: Während der ersten halben Periode (Siehe Seite 17) steigert sich die Wirbelgeschwindigkeit von Null bis zu einem bestimmten Maximum, nimmt ab und wird wieder Null; während der zweiten halben Periode wiederholt sich der gleiche oder wenigstens ähnliche Vorgang, jedoch an umgekehrt rotirenden Wirbeln. Die nachfolgenden Perioden bringen nichts Neues; es folgen dieselben Änderungszustände aufeinander. Insofern die Feldänderung die Veranlassung zur Strombildung ist, wird deren qualitative und quantitative Ausgestaltung einen analogen Einfluss auf die induzirten Spannungen ausüben. Richtung und Stärke der Spannungen werden in einem bestimmten, gesetzmässigen Zusammenhang zur Induktionsursache stehen. Was die

Richtung der induzirten Ströme anbetrifft, so lässt sich hiefür eine sehr einfache, auf Erfahrungsresultaten beruhende Gedächtnissregel angeben. Dieselbe lautet: Sieht das Auge der Kraftlinienrichtung entlang nach der Drahtrahmenfläche, so fliesst ein Strom in dem Uhrzeigersinn, wenn die Wirbelgeschwindigkeit eine Abnahme erfährt; hingegen entgegen demselben, wenn die Wirbelgeschwindigkeit erhöht wird. Wird diese Regel der eben geschilderten Art der Feldänderung angepasst, so zeigt sich, dass auch die induzirten Ströme während einer Periode zweimal ihre Richtung ändern und zwar innerhalb solcher Abschnitte, dass je die Hälfte der Periode von Strömen derselben Richtung ausgefüllt wird.

Der Ausgangspunkt der quantitativen Betrachtungen bildet auch hier die Gleichsetzung $E = \frac{\mathfrak{B} \times q}{10^8}$, worin, um es nochmals zu wiederholen, E die in einem bestimmten Zeitpunkt induzirte Spannung und $\mathfrak{B} \times q$ die auf eine Sekunde ausgedehnt gedachte, zugehörende Feldänderung darstellt. Diese Gleichsetzung ist so auszugestalten, dass sie das neue Grundschema auch nach der quantitativen Seite vollständig klarlegt. Ganz im Gegensatz zu dem Induktionsproblem des rotirenden Rahmens, bildet bei dem vorliegenden die Querschnittsfläche q den konstanten und ohne weitere Umformung leicht berechenbaren Faktor. Das variable Element ist dieses Mal $\mathfrak{B}$; es stellt die in dem jeweiligen, ins Auge gefassten Zeitpunkt angestrebte und eine Sekunde gleichmässig anhaltend gedachte Zugsspannungs-Vermehrung bezw. Verminderung des mittelsten Elektrizitätswirbels dar. Bereits auf Seite 118 wurde ganz allgemein hervorgehoben, dass sich die an der Feldänderung beteiligten Faktoren aus dem Maass, in dem die Elektrizitätswirbel der Stromkreisfläche ihre Rotationsgeschwindigkeit vergrössern bezw. verkleinern und aus der Anzahl dieser Wirbel zusammensetzen. Dieser Satz deckt sich, trotz seiner Zuspitzung für ein rein elektrisches Feld, vollkommen mit dem obigen. $\mathfrak{B}$ und q sind den beiden genannten Faktoren gleichartig. Die genaue Bestimmung der in den verschiedenen Zeitpunkten angestrebten Feldstärkeänderungen setzt die Kenntniss der innerhalb einer Periode auftretenden Feldstärkephasen,

oder, was dasselbe ist, die Verbildlichung der elektromagnetischen Feldstärkenwelle voraus. Dadurch, dass die Welle aufgezeichnet wird, lässt sich für die in ihren einzelnen Punkten angestrebten Feldstärkeänderungen ein überraschend einfaches Mittel zu deren ziffernmässigen Feststellung gewinnen. In der Fig. 47 ist ein Wellenstück mit seiner Zeitlinie skizzirt. Wie bereits schon früher erwähnt wurde, bringt die Wellenkurve den zeitlichen Änderungscharakter der Phasen zum Ausdruck. Ist die Kurve stetig gekrümmt, so besagt dies, dass sich die Phasen in jedem Zeitpunkt anders in ihrer Grösse ändern. Bildet hingegen die Kurve stückweise eine gerade Linie, so erhellt daraus, dass die Phasenänderung während des zugehörenden Zeitabschnitts eine vollkommen gleichförmige ist.

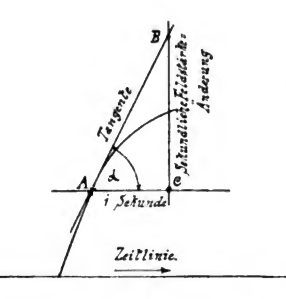


Fig. 47.

Der Grössenunterschied zwischen den dem Anfangs- und Endpunkt des geraden Stückes entsprechenden Phasen ergibt, wie ebenfalls leicht einzusehen, ein direktes Maass für die Grösse der gleichmässigen Änderung. Um den Änderungscharakter der Wellenkurve exakt bestimmen zu können, ist ein passendes Vergleichsmittel zu schaffen. Werden in den Kurvenpunkten Tangenten und Parallele zur Zeitlinie gezogen, so schliessen diese beiden Gattungen von Linien Winkel ein, welche in ihrer Grösse Alles enthalten, was zur genauen quantitativen Beurteilung der angestrebten Änderungen vonnöten ist. Wird auf einer solchen Parallelen, z. B. auf der der Fig. 47, eine Sekunde und zwar in einem geeigneten Maassstab von A aus abgetragen, und in dem Endpunkt eine die Tangente schneidende Senkrechte errichtet, so entsteht ein rechtwinkliges Dreieck ABC, das in seinen Seiten und dem Winkel α wichtige Grössen enthält. In Übereinstimmung mit dem soeben Angeführten, kann z. B. die begrenzte Tangente A B als geradliniges Kurvenstück angesehen werden. Da zu diesem Kurvenstück, gemäss der Fig. 47, der

Zeitabschnitt einer Sekunde gehört, so bringt dasselbe den im Punkt A vorhandenen Änderungscharakter und zwar auf eine Sekunde ausgedehnt gedacht, zum Ausdruck. Dementsprechend muss aber in der begrenzten Senkrechten C B das für das Grundschema so wichtige Maass für die innerhalb der Sekunde sich bildenden Feldstärkeänderung enthalten sein. Zwischen dem Winkel α und den Strecken A C und C B besteht eine einfache, sich den Lehren der Geometrie anschliessende Beziehung, welche den Quotienten $\frac{C\,B}{A\,C}$ dem sogenannten Tangens (tg) des Winkels α gleichsetzt. Der Nenner des Quotienten ist numerisch Eins; es entspricht daher bereits C B allein dem tg α. Die somit erhaltene Gleichsetzung C B = tg α ist von grosser Wichtigkeit. Sie besagt, dass in dem Grundschema der Induktion durch Wechselströme der Krümmungswinkel α das letztinstanzliche variable Element ist, und dass sein Tangens ziffernmässig der sekundlichen Zugspannungs-Vermehrung bezw. Verminderung des mittelsten Elektrizitätswirbels entspricht. Wird der tg α ganz allgemein mit dem Ausdruck Krümmungsfaktor belehnt, so ergibt sich für die induzirte Spannung des zweiten Schemas folgende höchst einfache typische Gleichsetzung:

$$E = \frac{\text{Krümmungsfaktor} \times q}{10^8} \quad \ldots \text{ Volts.}$$

Für die Winkelwerte 0°, 45° und 90° bestehen bekanntlich die charakteristischen Tangentenwerte Null, Eins und Unmessbargross. Schon allein diese wenigen Daten genügen, um richtige allgemeine Schlüsse über das quantitative Verhalten des induzirenden Ringfeldes zu ziehen. Parallel zur Zeitlinie liegende Bestandteile der Feldstärkenwelle induziren keine Spannungen; Kurvenstücke mit einem Krümmungswinkel bis zu 45° induziren verhältnissmässig geringe Spannungen; Kurvenstücke mit einem Krümmungswinkel über 45° und bis zu 90°, also solche mit recht steiler Richtung, bringen die quantitativ ergiebigsten Spannungswerte hervor. Die Feldstärkewellen müssen auch Spannungswellen hervorbringen, deren Krümmungen und Phasenwerte durchweg von den gleichzeitigen, entsprechenden Bestandteilen der ersteren und zwar oft wesentlich, verschieden sind. Dessenungeachtet

kann eine Änderung in der Form und Grösse der Spannungswellen nicht vorsichgehen, ohne dass zuvor eine solche mit den Feldstärkewellen vorgenommen wird.

Die landläufige Behandlungsart der Induktionsprobleme ist eine ziemlich spezialisirte, die obendrein den Nachteil hat, mit den wirklichen Vorgängen sehr oft auf feindlichem Fuss zu stehen. So wird z. B. in dem vorliegenden Fall als ganz selbstverständlich die Voraussetzung hingestellt, dass die Feldstärkewellen reine Sinusform besitzen. Nun wurde aber bereits auf Seite 133 darauf hingewiesen, wie unhaltbar die Annahme von Sinuswellen schon für die Ströme wird, welche, auf dem Wege der Bewegungsinduktion erzeugt, die Ampèrewindungen der wirbelerzeugenden Leiterspirale ins Leben rufen. Da diese Ampèrewindungen wiederum die Feldstärkephasen erzeugen, und eine Proportionalität von Ursache und Wirkung erneut durch das nicht gleichbleibende

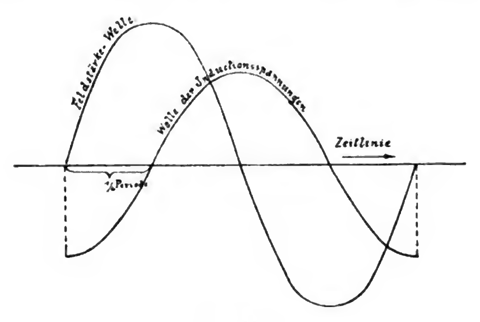


Fig. 48.

Drehvermögen der Moleküle, also durch die variable Durchlässigkeit, gestört wird, so erhellt daraus, dass zur Annahme von Sinuswellen für die Feldstärken erst recht keine Berechtigung vorhanden ist. Insofern Feldstärkewellen in Sinusform einen nicht uninteressanten Schluss auf die Gestalt und Lage der zugehörenden Spannungswelle zu ziehen gestatten, mag zu dessen Anführung ausnahmsweise die landläufige Voraussetzung platzgreifen. In der Fig. 48 ist sowohl die Feldstärkesinuskurve,

als auch die entsprechende Spannungswelle abgebildet. Hinsichtlich der Letzteren, lässt sich nicht nur auf geometrischem, sondern auch auf rechnerischem Wege nachweisen, dass auch sie die Form einer Sinuskurve besitzen muss. Da zur Zeitlinie parallele Kurvenstücke keine Induktionsspannungen hervorrufen, so folgt schon hieraus für die gegenseitige Lage der beiden Sinuskurven, dass die Phasen der E-Welle um $^1/_4$ der Periode später, als die gleichartigen der Feldstärkewelle gebildet werden; es besteht zwischen beiden Wellen eine Phasenverschiebung von $^1/_4$ Periode.

Wie die Spannungswelle hinsichtlich ihrer Form auch beschaffen sein mag, stets wird das mit dem Drahtrahmen verbundene Messinstrument nur einen Spannungswert anzeigen und zwar den effektiven. Da bei beinahe allen, in das Gebiet der Wechselstrominduktion einschlagenden Nutzanwendungen nur diese Spannung zu kennen und in die Rechnungen der Praxis einzuführen ist, so muss die Bestimmung ihrer quantitativen Ursache, also die der zugehörenden sekundlichen Feldstärkeänderung, eine Aufgabe von besonderer Wichtigkeit sein. Trotzdem es sich also blos um die Feststellung einer einzigen Grössenbeziehung handelt, macht selbst diese bei unregelmässig geformten Wellen (und das sind die meisten) grosse Schwierigkeiten. Der vorausberechnende Mann vom Fach pflegt sich um dieselben zu drücken, indem er von Grundformeln ausgeht, welche nur für Sinuswellen Gültigkeit haben. Die Differenzen, welche dadurch zwischen den Produkten auf dem Papier und denjenigen der Wirklichkeit auftauchen müssen, bilden für die allezeit hilfsbereiten regulirenden Vorrichtungen willkommene Objekte. Die der effektiven Spannung entsprechende sekundliche Feldstärkeänderung, ist aus der der mittleren Spannung abzuleiten. Diese Änderung wird erhalten, indem der Krümmungscharakter des der mittleren Feldstärkephase entsprechenden Kurvenpunktes zur Verwendung gelangt; denn diesem entspricht ein Krümmungswinkel, welcher das Mittel aus sämmtlichen zwischen der Null- und Maximumphase möglichen Winkel darstellt. Wirkt der Änderungsgrad der mittleren Phase während $^1/_4$ Periode beschleunigend bezw. verzögernd auf die Wirbelgeschwindigkeit ein, so lässt sich rechnerisch und geometrisch nachweisen, dass

die erlangte Zugspannungsänderung numerisch der maximalen Phase der Feldstärkesinuswelle gleichkommt. Ist die Einwirkung während der Dauer einer ganzen Periode vorhanden, dann ist die Zugspannungsänderung gleich dem Vierfachen der maximalen Phase und umfasst sie endlich den hier massgebenden Zeitraum einer Sekunde, so wächst sie ausserdem in dem Verhältniss der Periodenzahl an. Wird auch hier, wie in der Elektrotechnik üblich, die Periodenzahl durch den Schnörkel $\sim$ abgekürzt bezeichnet, so ergibt sich für die sekundliche Feldstärkeänderung der mittleren Spannung der mathematische Ausdruck $4 \times \sim \times \mathfrak{B}_{max}$; $\mathfrak{B}_{max}$ hat in demselben lediglich die Bedeutung eines Phasenwertes. Da nach den Angaben der Seite 20 unten, für E_{eff} $0{,}707\ E_{max}$ und für E_{mitt} $0{,}637\ E_{max}$ gesetzt werden kann, so lässt sich daraus auch ableiten, dass $E_{eff} = \frac{0{,}707}{0{,}637} E_{mitt}$ ist. Wird in diese Gleichsetzung für E_{mitt} die soeben festgestellte sekundliche Feldstärkeänderung, der Rahmenquerschnitt q und der Zahlenfaktor 10^8 sinnentsprechend eingesetzt, so ist die bei allen rechnerischen Entwickelungen zur Anwendung gelangende Grundformel für die effektive Spannung vollständig zusammengebaut. Sie lautet in ihrer kürzesten Form:

$$E_{eff} = \frac{4{,}44}{10^8} \times \sim \times \mathfrak{B}_{max} \times q \ldots\ldots \text{Volts.}$$

In dieser Gleichsetzung kommt zum Ausdruck, dass E_{eff} um so grösser wird, je grösser $\sim$ und $\mathfrak{B}_{max}$ angenommen wird. Es gewinnt im ersten Augenblick den Anschein, als ob hiemit etwas Neues an den Tag gefördert sei. Da jedoch ein grosses $\mathfrak{B}_{max}$ und eine hohe Periodenzahl, oder was damit in Zusammenhang steht, eine kleine Periode, Kurven von recht steilem Charakter ergeben, welche, wie bereits oben erwähnt, für die Quantität der induzirten Spannungen sehr ergiebig sind, so er-

weist sich das Neue lediglich als eine andersartige Wiederholung von bereits früher Erwähntem.

Wie bei dem ersten Induktionsschema gibt es auch bei diesem Wechselstromschema ein weiteres, bisher noch nicht angeführtes Mittel, die Effektivspannung zu möglichst hohen Beträgen hinaufzuschrauben. Dieses Mittel besteht in der Vermehrung der Drahtrahmenanzahl. Indem diese Rahmen zu einer Spirale untereinander verbunden werden, addiren sich die Spannungen und können in ihrer Gesammtheit nach aussen zur Wirkung gelangen. Jede Windung der Spirale wird von denselben Wirbeln durchsetzt, jede muss daher dieselbe Voltzahl liefern. Die Operation des Addirens lässt sich aber damit durch die einfachere des Multiplizirens ersetzen. Es vervielfacht sich die Effectivspannung einer Windung mit der Windungsanzahl (abgekürzte Bezeichnung Z). Der Faktor Z ist noch in die Grundformel einzuführen, wenn das Grundschema der Induktion durch Wechselströme sich nicht nur auf einen einzigen Drahtrahmen, sondern auch auf eine Drahtspirale erstrecken soll.

Damit sind die Betrachtungen über die speziellen Eigenschaften dieses Teils der Induktionslehre zu einem Ende geführt und sollen sie mit einem passenden Beispiel ihren völligen Abschluss finden.

Aufgabe. Eine Drahtspirale, welche auf einem geschlossenen Eisenring von kreisrundem Querschnitt befestigt ist, soll eine Effektivspannung von 1000 Volt liefern. Der Kreisdurchmesser des Ringes betrage 15 cm. Die Magnetisirung erfolge mit Hülfe einer zweiten Spirale, welche mit Wechselströmen von der Periodenzahl 50 gespeist werde. Die durch diese Spule im Maximum erreichte elektromagnetische Feldstärke entspreche 8000 Dynen. Gesucht wird die zur Hervorbringung der 1000 Volt erforderliche Windungsanzahl. Bei der Lösung der Aufgabe werde vorausgesetzt, dass die in der Spirale induzirten Spannungen nach der Form einer Sinuswelle variiren.

Lösung. Da in der erweiterten Grundformel der Faktor Z bestimmt werden soll, so bedarf dieselbe einer dementsprechenden Umformung. Die Durchführung derselben ergibt für Z den Ausdruck: $\frac{10^8 \times E_{eff}}{4{,}44 \times \sim \times \mathfrak{B}_{max} \times q}$. — In diesem Ausdruck ist

$E_{eff} = 1000$, $\sim = 50$, $\mathfrak{B}_{max} = 8000$ und $q = \frac{\pi \times 15^2}{4} = 176.4$.

Ziffernmässig gestaltet er sich demnach zu: $\frac{10^8 \times 1000}{4.44 \times 50 \times 8000 \times 176.4}$.

Wird die Ausrechnung durchgeführt, so wird eine Ziffer erhalten, welche in ihrer Abrundung auf ganze Zahlen 319 ausmacht. Soviel Windungen muss die Spirale haben, damit ihre Effektivspannung die Höhe von 1000 Volt erreichen kann.

Die gesammten bisherigen Entwickelungen des Abschnittes IV umfassten die Bekanntmachung mit den Mitteln zur Hervorbringung von Induktionsspännungen, die Feststellung des allgemeinen Entstehungsgesetzes, als Richtschnur für die Art, in welcher diese Mittel zu bethätigen sind; ferner die Herausschälung der an der quantitativen Ausgestaltung der Induktionsspannungen speziell beteiligten Faktoren und endlich die Darlegung von deren quantitativer Beteiligung in Form praktisch verwertbarer Gleichsetzungen. Ein Aufschluss über die bei der Induktion statthabenden, ureigentlichen Vorgänge, welche höchstwahrscheinlich durchweg rein mechanischer Natur sind, konnte leider nicht geboten werden, weil nach dieser Richtung positives Wissen bislang nur äusserst spärlich vertreten ist. Klarheit ist aber gerade hierüber sehr erwünscht, um in alle Winkel des Induktionsgebietes hineinleuchten und die Induktionsprobleme bis zu ihren äussersten Konsequenzen verfolgen zu können. Immerhin ist aber schon bei dem heutigen Kenntnisstand, wenn auch nicht lückenlos, die Klarstellung jener Wirkungen möglich, welche sich an den Energiebegriff und das Mayersche Erhaltungsgesetz anschliessen. Gerade dieser Teil der Induktionslehre ist ein Stiefkind der meisten traditionellen Behandlungsweisen des einschlägigen Lehrstoffes. Bei dem Vorgang der Induktion durch Bewegung ist das Anfangsglied in der Kette der Ursachen und Wirkungen mechanische Energie, das Endglied elektrische Energie. Bei der Induktion durch Wechselströme tritt am Anfang und am Ende der Kette elektrische Energie auf. In beiden Fällen liegen zwischen diesen extremen Gliedern Umbildungszustände und Formen, deren qualitative und quantitative Ausmittelung die Aufgabe für das Nachfolgende bilden wird. Während im Ein-



gang dieses Abschnittes das Bestreben vorherrschte, vom Allgemeinen zum Speziellen überzugehen, lässt sich dieses Prinzip hier nicht mehr mit Erfolg anwenden. Jede Induktionsart verlangt ihre Sonderbehandlung und mag diese, in Übereinstimmung mit der bisher gehandhabten Reihenfolge, zuerst für die Induktion durch Bewegung durchgeführt werden.

Im Anschluss an die Fig. 42 wurde hervorgehoben, dass das Messinstrument des rotirenden Drahtrahmens Strombildungen erkennen lässt. Mit der Anwendung wärmeanzeigender Apparate würde sich dieser Rahmen ausserdem auch als Träger einer Wärmeerzeugung präsentiren. Beide Erscheinungen beweisen durch die Gleichzeitigkeit ihres Auftretens, dass in dem rotirenden und in sich geschlossenen Rahmen elektrische Arbeit geleistet wird. Der Angelpunkt, um den sich das Folgende dreht, ist die Ausmittlung der Quelle dieses Arbeitsvermögens. Als äussere Bedingungen zur Hervorbringung von Induktionsspannungen wurden bereits früher das Vorhandensein eines unbeweglichen Wirbelfeldes und die Durchführung einer die Anzahl der durchsetzenden Kraftlinien ändernden Bewegung gekennzeichnet. Sind diese Bedingungen von einer experimentellen Anordnung erfüllt, dann lässt sich eine Thatsache feststellen, welche für die Lösung des aufgestellten Problems einen sehr wichtigen Fingerzeig gibt. Am auffälligsten gelingt der Nachweis dieser Thatsache an einer der Fig. 42 entsprechenden Versuchsanordnung. Wird nämlich der geöffnete Drahtrahmen von Hand gedreht und auf einer verhältnismässig hohen Tourenzahl erhalten, so muss die Muskelkraft zur Einhaltung der Rahmenbewegung, entgegen den sich darbietenden mechanischen Widerständen, mechanische Arbeit leisten. Die Leistung dieser Arbeit ist eine verhältnissmässig recht geringe, sie steigert sich jedoch sofort, wenn der Drahtrahmen geschlossen wird, wenn also Ströme in ihm zirkuliren. Diese Steigerung gibt sich sehr deutlich in dem Gefühl der wesentlich grösseren Muskelanstrengung zur Aufrechterhaltung der gleichen Tourenzahl zu erkennen. Mit dem Öffnen des Stromkreises, also mit der Unterbrechung der Stromzirkulation, stellt sich sofort wieder der ursprüngliche Zustand des unbeschwerlichen Drehens ein. Dieses einfache Experiment führt zu dem Schluss, dass die elektrische Arbeit der

mechanischen Rotationsarbeit ihr Dasein verdankt; sie entsteht also nicht etwa aus Nichts, sondern aus mechanischer Arbeit. Ausser dieser, sich ohne weiteres aufdrängenden Folgerung lässt sich noch eine andere an den Drehversuch knüpfen. Sie gipfelt darin, dass es nur eine mechanische Gegenkraft sein kann, welche der elektrische Arbeit produzirende Drahtrahmen der Muskelkraft entgegensetzt. Mit der Aufgreifung dieser Ansicht geht die Erforschung der Ursache dieser mechanischen Kraft Hand in Hand. Ein grosses Stück Scharfsinn ist zur Lösung der damit gegebenen Aufgabe nicht nötig; es genügt, wenn der Fundamentalsatz, dass ein jeder stromdurchflossene Leiter, also auch der geschlossene und rotirende Drahtrahmen, ein Wirbelfeld um sich erzeugt, ins Gedächtniss zurückgerufen wird. Zwischen dem mit dem Drahtrahmen umlaufenden Wirbelfeld und dem unbeweglichen des Spaltes treten ohne Zweifel Bewegungsantriebe auf, welche der Drehrichtung des Rahmens entgegenwirken und

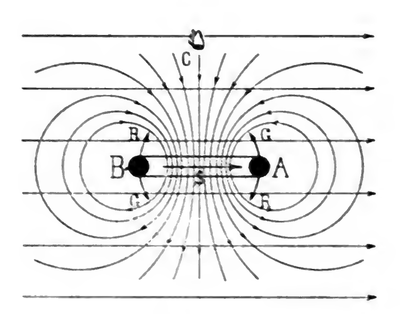


Fig. 49.

von der Drehkraft überwunden werden müssen. Dass diese zwischen den Feldern vorausgesetzten Bewegungsantriebe thatsächlich existiren und die gesuchte mechanische Gegenkraft ausmachen, lässt sich an der Fig. 40 entwickeln, welche den im Spaltfeld befindlichen rotirenden Rahmen beim Durchlaufen seiner Horizontallage darstellt. Die Richtung des Drehens ist durch

die Pfeile R, R angedeutet; aus ihr und der Richtung der Spaltfeldkraftlinien ergibt sich mit Hülfe der Handregel auf Seite 127 die Fliessrichtung des induzirten Stromes. In der Figur ist sie durch den Pfeil S hervorgehoben; ihm gemäss erscheint der Strom für ein in C befindliches Auge im Uhrzeigersinne zirkulirend. Das Wirbelfeld, welches der induzirte Strom hervorbringt, besitzt eine der Fig. 18 entsprechend ähnliche Gestalt. Die Richtung seiner Kraftlinien ist aus der auf Seite 70 gebotenen Regel bestimmt. Die Wirbelfeldbestandteile, welche in der Figur rechts oben und links unten liegen, wirken auf die in denselben Regionen befindlichen Spaltfeldwirbel abschwächend; während diejenigen links oben und rechts unten einen verstärkenden Einfluss auf die zugehörenden Spaltfeldpartien ausüben. Dieses verschiedene Verhalten der einzelnen Teile des Wirbelfeldes bewirkt, dass, analog der Betrachtung auf Seite 108, durch die Pfeile G, G in ihrer Richtung angedeutete Bewegungsantriebe auf den Drahtrahmen ausgeübt werden. Diese Bewegungsantriebe sind aber der Drehrichtung R, R gerade entgegengesetzt und müssen daher von der Drehkraft überwunden werden; sie machen einzig und allein die oben charakterisirte mechanische Gegenkraft aus. Die Bewegungsantriebe wirken lediglich in der horizontalen Lage des Rahmens im vollen Betrag der Drehkraft entgegen; in jeder andern Position tritt nur eine von dem Drehwinkel abhängige Komponente hemmend in Thätigkeit. In der vertikalen Stellung des Rahmens wird diese Komponente sogar zu Null, das heisst, die Drehkraft hat in dem dieser Stellung entsprechenden Zeitpunkt keine Gegenkraft zu überwinden. Bei der Bewegung des Drahtrahmens aus der horizontalen in die Vertikallage nehmen, wie an dem Grundschema der Induktion durch Bewegung gezeigt wurde, die in den entsprechenden Zeitpunkten induzirten Spannungen einen stetig kleiner werdenden Grössenbetrag an, mithin auch — ein Gleichbleiben des Stromkreiswiderstandes vorausgesetzt — die zugehörenden Stromstärken und die von ihnen abhängigen Wirbelfeldstärken. Daraus folgt aber, dass die mechanische Gegenkraft mit der Verkleinerung des Lagenwinkels viel rascher abnehmen muss, als es allein durch das Inkrafttreten der Komponente bedingt sein würde; das an sich schwächer werdende Rahmen-

feld verursacht die quantitativ ebenso intensive weitere Reduktion. Um sich mathematisch auszudrücken, lässt sich für den Rahmen die Thatsache einer im quadratischen Verhältniss abnehmenden Gegenkraft aufstellen. Diese Thatsache ist durch das Erhaltungsgesetz der Energie bedingt. Das Erhaltungsgesetz verlangt, dass die Leistung der Dreharbeit stets in einem bestimmten, äquivalenten Verhältniss zur entsprechenden Leistung der elektrischen Arbeit zu stehen hat. Die mechanische Leistung ist ein Produkt aus der Geschwindigkeit und der Kraft des Drehens, die elektrische ein solches aus der Spannung und der Stromstärke. Die Spannung ändert sich mit der Rahmenlage und in demselben Maassstab auch die Stromstärke; die Leistungsänderung der elektrischen Arbeit ist demnach eine quadratische. Die Drehgeschwindigkeit bleibt in allen Rahmenlagen dieselbe, daher muss die Drehkraft quadratisch abnehmen, wenn die Änderung der mechanischen Leistung denselben Charakter beibehalten will, wie er der elektrischen eigen ist. Da die Drehkraft und die Gegenkraft für den vorliegenden Fall völlig gleich anzunehmen sind, besteht das oben Gesagte auch für die letztere. Für ein im Spalt symetrisch angeordnetes Rahmensystem gilt, hinsichtlich der gesammten Gegenkraft, analog dasselbe, was auf Seite 134 von der induzirten Gesammtspannung entwickelt wurde. In einem solchen System ist die Gegenkraft eine konstante Grösse, die sich nur durch eine Veränderung des Gleichgewichtszustandes quantitativ beeinflussen lässt.

Das an dem Grundschema der Induktion durch Bewegung dargelegte Gesetz der mechanischen Rückwirkung induzirter Ströme ist für alle möglichen Fälle, in welchen sich diese Induktionsart verwirklichen lässt, gültig. Es kann deshalb auch in einer dementsprechend verallgemeinerten Fassung der Elektrizitätslehre einverleibt werden, und zwar etwa in der folgenden: *Wo immer eine Induktion durch Bewegung eingeleitet wird, verursacht der induzirte Strom das Entstehen von Bewegungsantrieben, welche der die induzirende Bewegung hervorbringenden Kraft entgegenwirken.* Dieses Gesetz hatte der Petersburger Physikprofessor Lenz im Jahre 1834 zum ersten Mal ausgesprochen. Allerdings waren seine Untersuchungen und Schlussfolgerungen

noch nicht von jener Übersichtlichkeit getragen, wie sie bei Zuhilfenahme des allgemeinen Entstehungsgesetzes der Induktion möglich wird. Auch war er weit entfernt davon, an seine Arbeiten Konsequenzen zu knüpfen, welche ihn zu dem damals noch nicht bekannten Erhaltungsgesetz der Energie geführt hätten.

Vom Standpunkt der Energiewanderung lässt sich der Induktionsvorgang durch Bewegung gemäss den bisherigen Darlegungen und bei ausschliesslicher Berücksichtigung seiner qualitativen Seite, in ein einfaches Schema fassen. Steht ein Quantum mechanischer Energie zur Verfügung, so kann sich dasselbe an einem Stromkreis bewegend bethätigen. Solange dieser Stromkreis geöffnet ist, braucht der Kraftfaktor nur jene Widerstände zu überwinden, welche in den Bewegungsmechanismen ihren Ursprung haben. Der Energievorrat wird in der Regel hiefür nur gering in Anspruch genommen. Wird der Stromkreis geschlossen und finden in seiner Fläche Wirbelanzahländerungen statt, so ist sofort ein grösserer Verbrauch an mechanischer Energie zu verzeichnen, welcher sich dadurch ankündet, dass, z. B. bei der Beibehaltung desselben Bewegungsfaktors, der Kraftfaktor eine wesentliche Vergrösserung erfährt. Die mehrverbrauchte Energie wandert in den Leiterkreis und geht auf die dortselbst in Ruhe befindliche Elektrizität über. Es entsteht durch die Wanderung ein Spannungsfaktor, welcher die Elektrizität, trotz der entgegenwirkenden Leiterreibung, in Bewegung versetzt und damit den Stromstärkefaktor ins Leben ruft. Mit der Ortsänderung der Energie wechselt diese auch ihren Namen. Aus der mechanischen wird elektrische Energie. Ihren Maassausdruck findet die elektrische Energie in der elektrischen Arbeit; sie ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke. Was mit der elektrischen Energie des Weiteren geschieht, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Betrachtung und kann daher ausser Acht gelassen werden. Die induzirte Stromstärke bewirkt die Bildung eines Wirbelfeldes, welches auf die Wirbel des stabilen Spaltfeldes abstossende Kräfte ausübt, die dem Kraftfaktor der mechanischen Energie entgegengerichtet sind. Das Auftreten dieser Kräfte ist in dem Energieschema unbedingt erforderlich, da nur sie dem bei der Energiewanderung hervortretenden Prinzip der gleichartigen Wirkung und Gegen-

wirkung Rechnung trägt. Keine elektrische, sondern nur eine mechanische Kraft kann das Grösserwerden des Kraftfaktors ohne Geschwindigkeitserhöhung auf natürliche Weise erklären. Eine Gleichgewichtserhaltung zwischen dem Mehrbetrag und den Abstossungskräften ist eine einfache und einleuchtende Vorstellung. Dasselbe, was für die Kräfte gilt, gilt auch für die Arbeiten. Die elektrische Arbeit wird mit Hülfe der mechanischen Gegenarbeit zur mechanischen Bewegungsarbeit in Zusammenhang gebracht.

Wird das gesammte Wirkungsschema noch mehr in die Einzelheiten zu erweitern versucht, so ist sehr bald die Wahrnehmung zu machen, dass der heutige Kenntnisstand noch einige beträchtliche Lücken aufzuweisen hat. Wie bereits schon einmal angedeutet, sind über die Punkte, auf welche Weise die Elektrizität zur Bewegung veranlasst wird, und welche Rolle die Spaltfeldwirbel dabei spielen, stichhaltende Erklärungen noch nicht geschaffen worden. Als plausibel und einigermassen zulänglich können in dieser Beziehung nur die im II. Abschnitt gegebenen Erklärungen der wirbelfelderzeugenden Ursache des induzirten Stromes und derjenigen der abstossenden Kraftwirkungen beider Felder gelten.

Mit diesen kurzen Darlegungen sind die einzelnen, bei der Energiewanderung statthabenden Vorgänge charakteristisch genug gestreift, um dem Leser das selbständige Herausschälen von Weiterungen und nutzbringenden Anwendungen zu ermöglichen, und um den Übergang zur rein quantitativen Seite des Wanderungsproblems entsprechend vorzubereiten.

Die durch den Induktionsvorgang zur Wanderung veranlasste Energie muss ihre Formänderung im Sinne des auf Seite 52 Gegebenen vollziehen; also so, dass einer beliebigen Menge der einen Zustandsform eine ganz bestimmte Menge der andern gleichwertig ist. Gemäss der Tabelle der gleichwertigen Zahlen, erzeugt jedes Kilogrammmeter mechanische Arbeit 9,81 Watts. Die elektrische Leistung ist daher ziffernmässig stets nahezu zehnmal so gross, wie die zur Umwandlung herangezogene mechanische Leistung. Im allgemeinen haben sich Arbeitsleistungen als die Produkte zweier, physikalisch gänzlich verschieden gearteter Faktoren erwiesen. Damit ist aber die Mög-

lichkeit gegeben, dass die Produktbildung aus einer quantitativ sehr variabeln Beteiligung der beiden Faktoren hervorgehen kann. Die Faktoren dürfen alle möglichen Zahlenwerte annehmen, nur müssen diese jeweils in einem solchen Grössenverhältniss zu einander sein, dass bei der Vereinigung der Faktoren gerade das Produkt entsteht. Bei allen bisher bekannten Arbeitsformen der Energie lassen sich die Faktoren in zwei Gruppen sondern, welche sich durch Übereinstimmung in der Wirkungsart auszeichnen. Die Mengenvergleichung von Faktoren derselben Gruppe ist bei äquivalenten Leistungen ebenso wertvoll, wie die der Leistungen selbst. Bei der mechanischen und elektrischen Arbeit ist der Mengenvergleich der Leistungen stets auf beinahe das Zehnfache angelegt. Dieser Umstand ist bei der Vergleichung der übereinstimmenden Faktoren nicht ausser Acht zu lassen. Das eine Paar derselben kann z. B. durch eine geeignete experimentelle Anordnung in ein vorausbestimmtes, willkürliches Verhältniss gebracht werden; das Grössenverhältniss des andern Paares ist damit seiner freien Gestaltung verlustig gegangen und gezwungen, einen Zahlenwert anzunehmen, welcher, mit dem des ersten Verhältnisses vervielfacht, 9,81 ergibt. In ein Zahlenbeispiel übersetzt, besagt dieses Zwangsverhältniss: Ist der eine Faktor der elektrischen Leistung zweimal so gross, als der entsprechende der mechanischen Leistung, so muss der ergänzende elektrische Faktor rund fünfmal grösser, als der zugehörende mechanische Faktor sein. Ist in einem Umwandlungsschema das Mengenverhältniss gleichartiger Faktoren, welche Ziffernbeträge dieselben auch annehmen mögen, konstant, so ergibt sich für diese Faktoren ein proportionaler Änderungscharakter. Geht die Konstanz in den einzelnen Gleichgewichtszuständen verloren, dann ist dies auch hinsichtlich der Proportionalität der Fall.

Bei der Drahtrahmenanordnung haben die Faktoren der mechanischen Leistung die Bedeutung einer Drehkraft und Drehgeschwindigkeit, und die Faktoren der elektrischen Leistung die einer induzirten Spannung und Stromstärke. Es frägt sich, welche von diesen vier Faktoren paarweise zusammengehören. Um dies festzustellen, ist die Leistung der mechanischen Gegenarbeit heranzuziehen. Ihre Faktoren sind die Abstossungskräfte und die Drehgeschwindigkeit; ihre Menge muss numerisch der

Leistung der mechanischen Dreharbeit gleichsein. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Drehkraft den Rahmen bewegt und die, mit welcher die Abstossungskräfte fortwährend zu ringen haben, sind ein und dasselbe. Daraus und aus der Gleichheit der beiden mechanischen Leistungen folgt auch die Gleichheit der Drehkraft und der Abstossungskräfte. Die Abstossungskräfte verdanken ihr Dasein dem Wirbelfeld und dieses wird von der induzirten Stromstärke erzeugt. Dieser Umstand führt zu dem wichtigen Schluss, dass die Drehkraft und die induzirte Stromstärke das eine Paar und die Drehgeschwindigkeit und die induzirte Spannung das andere Paar der gleichartigen Faktoren ausmachen. Dass die Spannung der Geschwindigkeit entspricht, ergibt sich übrigens auch aus der auf Seite 132 aufgestellten Gleichsetzung. In derselben kann die Drehgeschwindigkeit als die von der Querschnittsfeldstärke und dem Lagenfaktor beeinflusste Umfangsgeschwindigkeit aufgefasst werden.

Hiemit wäre auch die quantitative Seite der bei der Induktion durch Bewegung statthabenden Energiewanderung genügend gekennzeichnet. Es erübrigt noch, den Umwandlungsprozess in seiner Gänze, und zwar unter der Voraussetzung praktisch wichtiger Gleichgewichtsbedingungen, darzustellen. Die Aufgabe ist dabei die, für einzelne Faktoren bestimmte Verhaltungsbedingungen aufzustellen, und zu untersuchen, wie sich die andern Faktoren bei ihrer zwangsweisen Änderung quantitativ gestalten. Als Änderungsmittel der jeweiligen Gleichgewichtszustände kommen hier hauptsächlich die der Elektrizitätsbewegung entgegenwirkenden Kräfte, also z. B. der Stromkreiswiderstand, in Frage. Das Gleichgewicht kann allerdings auch durch willkürliche Beeinflussung der Arbeitsfaktoren gestört werden; jedoch kommt diesem Mittel nicht die grosse Bedeutung zu, wie sie die Widerstandsänderung besitzt. Für die Elektrotechnik sind von den möglichen Gleichgewichtssystemen der wandernden Energie hauptsächlich drei bedeutsam geworden. Da sie den Wirkungstypus der verschiedenen Arten von Dynamomaschinen enthalten, ist ihre Namhaftmachung und die Erforschung ihrer Bethätigungsweise auch hier unumgänglich. Im Nachstehenden sind die Systeme der Reihe nach aufgeführt.

Ein Vorrat mechanischer Energie werde so zur Umwandlung herangezogen, dass der Geschwindigkeitsfaktor, bei der verschiedensten Inanspruchnahme des Vorrates, einen möglichst gleichbleibenden Charakter wahrt. Dadurch wird der Kraftfaktor zum einzig veränderlichen Element und sein ziffernmässiger Betrag nimmt jeweils die zur Erzielung des Leistungsproduktes erforderliche Höhe an. Eine solche Verhaltungsweise der mechanischen Faktoren ist z. B. in jeder gut regulirenden Dampfmaschine weitgehendst vertreten. Dieser Wärmemotor hat in allen Arbeitsphasen eine nahezu gleiche Umdrehungszahl und bewältigt die quantitativ verschiedenen Ansprüche durch passend veränderte Dampfmengen. Die Faktoren der aus den mechanischen Leistungen hervorgehenden elektrischen Leistungen seien, analog dem Obigen, der Art, dass die induzirte Spannung in ihrer Grösse unveränderlich bleibt und lediglich die induzirte Stromstärke die Verschiedenheit der Produkte ermöglicht. Ein solches Verhalten der elektrischen Faktoren schliesst die Bedingung ein, dass die Mengenverhältnisse der gleichartigen Faktoren immer konstant sind. Diese Forderung ist hinsichtlich der induzirten Spannung einhaltbar, wenn der variable Einfluss des Lagenfaktors durch die Anwendung eines symetrisch angeordneten Rahmensystems (Siehe Seite 134) vernichtet wird, und wenn namentlich die elektromagnetische Spaltfeldstärke einen gleichbleibenden Einfluss ausüben kann. In hohem Maasse ist in der sogenannten Verbunddynamomaschine die angedeutete Wirkungsweise der elektrischen Faktoren gewährleistet; in beschränkterem Umfang gibt auch die vielverwendete Nebenschlussdynamo nach dieser Richtung befriedigende Resultate. Das Spiel der Leistungsfaktoren ist in dem gezeichneten Schema ein verhältnissmässig einfaches. Mit dem sich ändernden Widerstand des elektrischen Stromkreises, ändert sich einzig und allein die induzirte Stromstärke und zwar gemäss dem Ohmschen Quotienten $\frac{E}{W}$. Die geänderte Stromstärke ruft eine Verschiedenheit des Wirbelfeldes und mithin auch eine der Abstossungskräfte hervor. Da die Geschwindigkeit im Systeme erhalten bleiben soll, so ist die Drehkraft derart abzuändern (z. B. durch geeignetes Zumessen der Dampfmengen), dass sie

den Abstossungskräften gleich wird. Diese einfache Art der Gleichgewichtshaltung kann sich jedoch nur dann abspielen, wenn die mechanische Leistungsfähigkeit grösser ist, als die angestrebte elektrische Leistung. Wird mehr von dieser gefordert, als jene zu geben vermag, so tritt eine Änderung des Wirkungsprinzipes ein. Die Stromstärke und die Abstossungskräfte erreichen einen Maximalwert und zwar jenen, welcher der grösstmöglichen Drehkraft des mechanischen Motors entspricht und die induzirte Spannung nimmt so ab, dass ihr Betrag dem Ohmschen Produkt $S \times W$ gleichkommt. Die Drehgeschwindigkeit verlangsamt sich und erreicht ein Maass, welches aus dem Zwang der Gleichwertigkeit beider Leistungen hervorgeht. Es sei noch bemerkt, dass auch gleichzeitig eine Änderung in den sonst konstanten Mengenverhältnissen der gleichartigen Faktoren eintritt.

Im zweiten hier anzuführenden Gleichgewichtssystem ist der Geschwindigkeitsfaktor ebenfalls konstant, und der Drehkraftfaktor entsprechend variabel anzunehmen. Der Unterschied liege dieses Mal in dem veränderlichen Charakter beider Faktoren der elektrischen Leistung. Es soll dementsprechend z. B. eine Verkleinerung des äussern Widerstandes nicht nur, wie im Obigen, eine Vergrösserung der Stromstärke, sondern auch eine solche der induzirten Spannung nachsichziehen. Ein solches Verhalten der elektrischen Faktoren wird möglich, wenn die Mengenverhältnisse der gleichartigen Faktoren mit der Abänderung des Stromkreiswiderstandes ebenfalls andere Ziffernbeträge annehmen können. Jndem der elektromagnetischen Spaltfeldstärke ein veränderlicher Charakter aufgenötigt wird, lässt sich das Gewünschte ganz bequem erreichen. In der Elektrotechnik gibt die mit einer gut regulirenden Dampfmaschine verbundene, sogenannte Seriendynamo Gelegenheit, einen Umwandlungsprozess der gewünschten Art zu beobachten. Bei dieser Maschine bewirkt eine Änderung des Stromkreiswiderstandes in erster Linie eine solche der induzirten Stromstärke, und zwar, gemäss dem Ohmschen Gesetz, im entgegengesetzten Grössensinne. Die Variirung der induzirten Stromstärke hat die gleichartige Abänderung der Spaltfeldstärke und namentlich die der Abstossungskräfte der Wirbelfelder im Gefolge. Die geänderte Spaltfeld-

stärke verursacht trotz der gleichbleibenden Drehgeschwindigkeit die Entstehung einer quantitativ umgeformten induzirten Spannung und demgemäss die eines andern Mengenverhältnisses zwischen diesen beiden Faktoren. Die Grössenänderung der Stromstärke und der Spannung erfolgt in jeder neuen Gleichgewichtsanordnung in solchem Umfang, dass der Ohmsche Quotient $\frac{E}{S}$ ziffernmässig den Wert des jeweils vorhandenen Stromkreiswiderstandes annimmt. In dem Verhältniss, in welchem die Abstossungskräfte abgeändert sind, muss sich auch die variable Drehkraft halten, wenn die Bedingung des Gleichbleibens der Drehgeschwindigkeit bestehen bleiben soll. Da die Abstossungskräfte sowohl durch das Spaltfeld, als auch durch das Drahtrahmenfeld einen Änderungsimpuls erfahren, und die Stärke des ersteren für die Spannungsgrössen, die Stärke des letzteren für die Stromstärkegrössen bestimmend sind, so ist damit direkt ausgesprochen, dass in dem vorliegenden Gleichgewichtssystem einzig und allein die Drehkraft die numerische Neubildung der beiden elektrischen Faktoren aufzubringen hat.

Der Umstand, dass eine Serienmaschine durch die Widerstandsänderung zur Variirung beider Leistungsfaktoren gezwungen ist, wurde von der Praxis unangenehm empfunden. Der Verwendungsbereich dieser Maschinengattung erschien dadurch sehr beschränkt. Für die Zwecke der Elektrotechnik konnte sie nur dadurch wertvoll werden, dass sich mit ihr eine Konstanthaltung der Stromstärke ermöglichen liess. Gelang diese, so war damit eine zulängliche Einrichtung zum Speisen hintereinander geschalteter Nutzapparate geschaffen. Thatsächlich wurden für die Seriendynamo mehrere Methoden zur Aufrechterhaltung der Stromstärke ersonnen, während sich die Nebenschluss- und Verbundmaschinen als hiezu vollkommen untauglich erwiesen. Eine der einfachsten dieser Methoden war, die Serienmaschine mit einer Dampfmaschine von konstanter Füllung, also auch von konstanter, mittlerer Drehkraft zu verbinden, welche ihren verschiedenen Inanspruchnahmen durch entsprechende Toureneinstellung nachkam. Das aus einer derartigen Anordnung hervorgehende Gleichgewichtssystem ist das Dritte



der Systeme, welche besondere Beachtung verdienen. Bei ihm wird der Vorrat mechanischer Energie so zur Umwandlung herangezogen, dass der Kraftfaktor einen gleichbleibenden Charakter bewahrt, während der Geschwindigkeitsfaktor die ziffernmässig verschiedenen mechanischen Leistungen bewerkstelligt. Die gleichartigen elektrischen Faktoren zeigen dasselbe Verhalten. Die induzirte Stromstärke bleibt sich stets gleich, während die induzirte Spannung das variirende Element verkörpert. Die Möglichkeit eines derartigen Umwandlungsschemas ist an die Bedingung geknüpft, dass die Mengenverhältnisse der gleichartigen Faktoren bei den verschiedenen quantitativen Bildungen konstant bleiben. In Gleichgewichtszuständen sind die einander entsprechenden Abstossungskräfte und Drehkräfte numerisch gleich. Da die Abstossungskräfte von der Spaltfeld- und der Rahmenfeldstärke abhängen, so müssen auch diese beiden Feldstärken einen konstanten Charakter annehmen, wenn die Stromstärke und die Mengenverhältnisse der gleichartigen Faktoren gleichbleiben wollen. Alle diese Forderungen erfüllt die mit der Dampfmaschine von konstanter Füllung verbundene Seriendynamo; dieses Maschinenarrangement kann daher mit Fug und Recht als typischer Vertreter des gekennzeichneten Gleichgewichtssystems angesehen werden. Das Spiel der Leistungsfaktoren ist auch hier ein einfaches. Mit dem sich ändernden Stromkreiswiderstand findet eine Änderung der induzirten Spannung, und zwar nach Maassgabe des Ohmschen Produktes S × W, statt. Die Spannungsänderung ist in diesem Beispiel nicht, wie in dem vorigen, durch die geänderte Spaltfeldstärke bestimmt, denn diese bleibt konstant, sondern sie geht aus der Möglichkeit hervor, dass der gleichartige Geschwindigkeitsfaktor seine Grösse wechseln kann. Von dieser Möglichkeit macht die Drehgeschwindigkeit Gebrauch, indem sie sich so umändert, dass die mechanische Leistung der durch den Widerstand und die konstante Stromstärke bestimmten elektrischen Leistung äquivalent wird. Das in den letzten beiden Gleichgewichtssystemen beschriebene Faktorenspiel ist ebenfalls nur möglich, solange die mechanische Leistungsfähigkeit grösser als die angestrebte elektrische Leistung bleibt. Ist das nicht mehr der Fall, dann ist auch hier eine der im ersten System geschilderten analoge

Änderung des Wirkungsprinzipes zu verzeichnen. Die Ausspinnung des Einschlägigen sei jedoch dieses Mal dem Leser überlassen.

Auf Seite 111 wurden, in Anlehnung an die quantitative Ermittelung des Bewegungsantriebes eines stromdurchflossenen Leiters im Spaltfeld, Betrachtungen über die statthabende Energiewanderung in Aussicht gestellt. Dieselben sind zum vollen Verständniss des Prinzipes, elektrische Arbeit in mechanische umzuwandeln, unumgänglich notwendig. Wie sich im Folgenden zeigen wird, spielen bei diesem Umformungsvorgang die Wirkungen der Induktion durch Bewegung eine grosse Rolle. Es ist daher begreiflich, dass erst hier mit der Darstellung des noch Fehlenden begonnen werden kann. Die Hervorbringung mechanischer Leistungen aus elektrischen ist die Umkehrung des Vorganges, elektrische Leistungen aus mechanischen zu gewinnen. Da der letztere Vorgang mit Hülfe des Drahtrahmenschemas eingehend kennengelernt werden konnte, dürfte es auch für die folgenden Betrachtungen sehr angebracht sein, dieselben nicht an einen isolirten Leiterstab, sondern entweder an einen einzelnen, oder eine Gruppe symetrisch angeordneter Drahtrahmen zu knüpfen. Das Gruppenarrangement hat, wie bereits auf Seite 134 hervorgehoben, den Vorzug, einen von der Rahmenlage unabhängigen Bewegungsantrieb zu ergeben. Durch den gleichen experimentellen Aufbau ist ausserdem ein etwaiges Vorhandensein von Analogien in den Details der Vorgänge viel leichter zu erkennen und ermöglicht sich durch diese eine kürzere Fassung des Nachfolgenden.

Bei einem in einem Spaltfeld gleichförmig rotirenden, stromdurchflossenen Drahtrahmen ist vom rein physikalischen Standpunkt aus der Vorgang der, dass die Bewegungsantriebe gegenwirkende Kräfte zu überwinden haben, welche bei der vorhandenen Geschwindigkeit numerisch so ausgefallen sind, dass sie den umdrehenden Kräften gerade das Gleichgewicht halten. Der Drahtrahmen produzirt mechanische Arbeit, welche, da sie an das Vorhandensein des Spaltfeldes und an das eines elektrischen Stromes gebunden ist, zu diesen Grössen in engster Beziehung stehen muss. Eine quantitative Untersuchung der drei Grössen des Ohmschen Gesetzes fördert Thatsachen zu Tage, welche das

Bestehen eines Zusammenhanges ausser Zweifel stellen. Ein Vergleich des Stromkreiswiderstandes und der Stromstärke mit der vorhandenen Spannung zeigt nämlich, dass das Ohmsche Produkt S × W wesentlich kleiner als die Stromquellenspannung ist. Dieses Produkt bildet mit der Stromstärke zusammen das Maass für die lediglich in Wärme umgewandelte elektrische Arbeit. Nach Abzug des bei der Wärmebildung beteiligten Spannungsbetrages von der Gesammtspannung verbleibt ein Rest, welcher im Verein mit der Stromstärke ein Arbeitsquantum verkörpert, das scheinbar verloren geht, in Wirklichkeit aber das Äquivalent der geleisteten mechanischen Arbeit repräsentirt. Diese Anschauung gewinnt noch sehr an Wahrscheinlichkeit durch die leicht zu beobachtende Erscheinung, dass eine Änderung der gegenwirkenden Kraft, ohne eine gleichzeitig entgegengesetzt vorsichgehende Umwandlung der Tourenzahl nur dadurch möglich wird, dass sich die Stromstärke entsprechend ändern kann. Die mit der Kraftumformung bewirkte Änderung der mechanischen Leistung muss notgedrungen die durch die neugebildete Stromstärke angezeigte Änderung der elektrischen Leistung zur Voraussetzung haben. Bei der Behandlung des Problems der Induktion durch Bewegung wurde auf die Notwendigkeit einer mechanischen Rückwirkung der entstehenden elektrischen Arbeit hingewiesen. Im vorliegenden Fall ist umgekehrt eine elektrische Rückwirkung auf den Drahtrahmenstromkreis anzunehmen. Im Hinblick auf den Spannungsrest kann diese Rückwirkung nur darin bestehen, dass durch die kraftüberwindende Drehbewegung eine dem Rest numerisch gleiche Gegenspannung hervorgebracht wird. Die Bildung der induzirten Spannung ist ein Vorgang, dessen Vorsichgehen besonders dann gut einleuchtet, wenn lediglich die Drehbewegung, nicht aber der Rahmenstrom und das Rahmenfeld als vorhanden angenommen wird. Zum Beweis, dass thatsächlich eine Gegenspannung erzeugt wird, lässt sich die Fig. 49 sehr gut verwenden. In derselben deuten die Pfeile G, G die Richtung an, in welcher sich der Rahmen bewegen würde, wenn er den gegenwirkenden Kräften preisgegeben wäre. Es ist dies dieselbe Richtung, in welcher der Rahmen bei seiner Verwendung als Bewegungsorgan umlaufen muss. Aus dieser und der Stromrichtung ergibt sich mit Hülfe

der auf Seite 128 stehenden Fingerregel die Richtung der induzirten Spannung, welche dem Pfeil S und somit auch der Stromquellenspannung entgegen weist. Das Gesetz des Auftretens von Gegenspannungen gilt nicht allein für das Rahmengebilde, sondern hat auch ein allgemeines Gepräge. Es ist das Analogon zum Lenz'schen Gesetz und lässt sich kurz dahin zusammenfassen: Wenn ein in einem Felde befindlicher, stromdurchflossener Leiterkreis durch dieses Bewegungsantriebe erhält und denselben Folge leistet, induzirt er stets Spannungen, welche der Stromquellenspannung entgegenwirken. Unter Zugrundlegung dieser Erkenntniss lässt sich der Umwandlungsvorgang der elektrischen Energie in qualitativer Hinsicht mit wenigen Worten zusammenfassen. Die von der Stromquellenspannung zum Fliessen gebrachte Elektrizität erzeugt in der Drahtrahmenumgebung ein Wirbelfeld, welches im Verein mit dem Spaltfeld den Rahmen zum Umdrehen bringt. Der Umdrehung setzen sich Kräfte entgegen, die von dem Bewegungsantrieb überwunden werden, wobei derselbe mechanische Bewegungsarbeit leistet. Durch die Rotation entstehen im Drahtrahmen Induktionsspannungen, welche der Stromquellenspannung entgegen gerichtet sind und von der fliessenden Elektrizität ebenso bewältigt werden, wie die Reibung der Stromkreisleiter. Diese Gegenspannungen verkörpern die elektrische Rückwirkung der mechanischen Arbeit; sie zwingen die fliessende Elektrizität zur Leistung einer äquivalenten elektrischen Arbeit.

Um das Wanderungsproblem auch nach der quantitativen Seite richtig zu erfassen, ist es notwendig, zunächst die für einen Leiterstab gültige Gleichsetzung des Bewegungsantriebes P (siehe Seite 110) auf das System der symetrisch angeordneten Drahtrahmen zu erweitern. Für einen einzelnen, mit seiner Fläche wagrecht im Spaltfeld liegenden Drahtrahmen ist der Bewegungsantrieb leicht angebbar. Die Anordnung der Fig. 39 ist für zwei Drahtquerschnitte auf der Linie A B, welche von Strömen gleicher Stärke, aber entgegengesetzter Richtung durchflossen werden, umzuformen. Es entsteht dadurch ein der Fig. 16 entsprechendes Rahmenfeld, welches, im Verein mit dem Spaltfeld, in dem einen Querschnitt einen abwärts, in dem andern



Querschnitt einen aufwärts gerichteten Bewegungsantrieb derselben Grösse hervorbringt. Die Tendenz zur geradlinigen Fortbewegung geht bei dem Drahtrahmen in eine solche zum Drehen über; wobei sich der gesammte Bewegungsantrieb im Verhältniss zu dem des Leiterstabes verdoppelt. Die Formel für P hat demnach bei einem Drahtrahmen die Fassung: $P = \frac{\mathfrak{B} \times S \times 2 L}{9\,810\,000}$ kgr. Gemäss den Darstellungen auf Seite 108 ist der Bewegungsantrieb des stromdurchflossenen Stabes senkrecht zu den Spaltfeldkraftlinien gerichtet. Da die dem Stab entsprechenden Bestandteile des Rahmens, welche Drehlage der letztere auch haben mag, eine ebensolche räumliche Anordnung aufweisen, wie dieser, so gilt diese Richtung auch für den Bewegungsantrieb des Rahmens. Hieraus und aus der Berücksichtigung der Thatsache, dass für die Menge einer mechanischen Arbeit immer nur die in die Bewegungsrichtung fallenden Kraftbeträge zur Geltung gelangen, folgert für andere wie horizontale Rahmenlagen eine nur teilweise Ausnützung des in seiner Grösse unveränderlich annehmbaren Bewegungsantriebes. Um die Art der Abhängigkeit zwischen dem arbeitbildenden Betrag des Bewegungsantriebes und dem Lagenwinkel ziffernmässig festzustellen, kann die passend abgeänderte Fig. 45 als Ausgangspunkt dienen. Die dem halben Bewegungsantrieb entsprechende senkrechte Dreieckseite wird länger als die senkrecht auf der Rahmenfläche stehende und die halbe Drehkraft darstellende Seite. Infolgedessen vertauschen die Winkel α und 90^0 ihre Stellungen und ergibt sich aus diesem umgeformten Dreieck die geometrische Beziehung: Drehkraft $=$ $\sin \alpha \times$ Bewegungsantrieb. Diese einfache Gleichsetzung ermöglicht die Aufstellung einer der obigen sehr ähnlichen Formel für die gesammte Drehkraft, welche von einem System symetrisch angeordneten und von der gleichen Stromstärke durchflossenen Drahtrahmen hervorgebracht wird. Anstatt die Drehkräfte der einzelnen Drahtrahmen zusammenzuzählen, wird in Folge der symetrischen Anordnung und des sinusartigen Änderungscharakters dasselbe Resultat erzielt, wenn die Rahmenanzahl mit der mittleren Drehkraft vervielfacht wird. Die mittlere Drehkraft ist 0,637 der maximalen; die Formel für die maximale ist bereits festgestellt; demnach bedarf es nur einer Vervielfachung derselben

mit 0,637 × Z, um zu der Formel für die gesammte Drehkraft eines Rahmensystems zu gelangen. Diese Formel ist für den Elektromotorenbau von grosser Wichtigkeit; sie gibt über die Dimensionirung derjenigen Grössen Aufschluss, welche eine Drehkraft von bestimmter Grösse hervorrufen. Wird auch für die Drehkraft des Rahmensystems die Buchstabenbezeichnung P beibehalten und soll dieselbe ihren Ausdruck in Kilogrammen finden, so nimmt die Formel die Gestalt an:

$$P = \frac{1{,}274}{9\,810\,000} \times \mathfrak{B} \times S \times Z \times L \ldots\ldots \text{kgr.}$$

Sollen demnach in einem gegebenen Rahmensystem recht grosse Drehkräfte disponibel werden, so bestehen die Mittel dazu in der Anwendung entsprechend grosser Stromstärken und Spaltfeldstärken. Da in der Gleichsetzung lediglich die Stromstärke, nicht aber die Stromquellenspannung an der Drehkraftbildung beteiligt ist, so geht hieraus und zwar genau wie im Induktionsschema die Folgerung hervor, dass bei der Energiewanderung der elektrische Faktor Stromstärke dem mechanischen Faktor Drehkraft gleichartig ist. Die Mengenverhältnisse dieser beiden Faktoren behalten in der Grundformel einen konstanten Wert und die Mengenänderungen demzufolge einen proportionalen Charakter, wenn $\mathfrak{B}$ sammt $Z \times L$ in ihrer Grösse gleich bleiben.

Wenn das Rahmensystem, trotz Vorhandensein der Drehkraft erzeugenden Stromstärke, nicht in Bewegung gerät, so ist damit zum Ausdruck gebracht, dass die vorhandenen und zu überwindenden Widerstände grösser als die Umtriebskraft sind. In diesem Fall erzeugt die gesammte Stromquellenspannung fliessende Elektrizität, deren Stromstärke durch den Quotienten $\frac{E}{W}$ ziffernmässig bestimmt ist. Die entstehende elektrische Arbeit wird lediglich in Wärme umgewandelt. Rotirt hingegen das Rahmensystem, so sind die Widerstände kleiner als die von demselben erzeugbare Drehkraft. Jetzt kann und wird die Stromquellenspannung lediglich soviel Elektrizität zum Fliessen bringen, dass die entsprechende Stromstärke eine diesen Widerständen gleiche Drehkraft hervorruft. Der Rest der Spannung steht für andere Zwecke zur Verfügung und zwar besorgt er,

wie bereits erwähnt, die Überwindung der aus der Bewegung resultirenden Gegenspannung. Dass aus dem Vermögen, einen Überschuss an Drehkraft zu erzeugen, nichts anderes als Bewegung hervorgehen kann, ist die Folge eines mechanischen Grundgesetzes, welches verlangt, dass eine jede durch eine Gegenkraft unausgeglichene Kraft sich massenbewegend bethätigt. Da die Grösse der hervorgebrachten Bewegung in enger Beziehung zur Grösse der Gegenspannnng bezw. zu der des Restes der Stromquellenspannung zu stehen scheint, so ist die Aufstellung einer gesetzmässigen Beziehung zwischen diesen Dingen eine ebenso notwendige Aufgabe, wie die, die Ursachen der gesammten Drehkraft nach Grösse und Art buchstabenmässig zusammenzubauen. Da es sich bei der Gegenspannung um eine Spannung handelt, die in einem Rahmensystem durch Bewegungsinduktion zum Entstehen gebracht wird, so ist mit der Formel auf Seite 135 schon alles Erforderliche gegeben. Allerdings empfiehlt sich für den vorliegenden Fall eine Umstellung der Formelbestandteile und zwar so, dass der Bewegungsmaasstab, die Tourenzahl, zur gesuchten Grösse wird. Um die in der Formel auftretende Spannung sofort als Gegenspannung oder als diese überwindende Spannung erkennen zu können, führe sie die Buchstabenbezeichnung e. Dementsprechend erhält die umgestellte Formel die Gestalt:

$$n = 15 \times 10^8 \frac{e}{\mathfrak{B} \times Z \times \text{Rahmenfläche}}.$$

Diese zweite Hauptformel zeigt ohne weiteres, was übrigens ebenfalls mit den früheren Betrachtungen übereinstimmt, dass der mechanische Faktor Geschwindigkeit dem elektrischen Faktor Spannung gleichartig ist, und dass ein konstanter Nenner eine proportionale Mengenänderung und ein konstantes Mengenverhältniss dieser zusammengehörenden Faktoren ergibt. Ausserdem lässt sich aus der Formel die für die Praxis sehr wichtige Thatsache ablesen, dass ein gegebenes Rahmensystem nur dann recht schnell rotiren wird, wenn der Spannungsüberschuss sehr reichlich und die Spaltfeldstärke klein gehalten wird. Im Nachstehenden soll an einer Aufgabe die praktische Verwendbarkeit der beiden Hauptformeln gezeigt werden.

Aufgabe. Ein symetrisches, stromdurchflossenes Rahmensystem soll zum Antrieb einer maschinellen Einrichtung dienen, welche zu ihrem regelrechten Betrieb einer mechanischen Leistung von 2 P-S und einer minutlichen Tourenzahl 1000 bedarf. Das Rahmensystem bestehe aus 250 Rahmen, von je 20 cm Länge und 15 cm Breite und rotire in einem Spaltfeld, dessen elektromagnetische Feldstärke 8000 Dynen betrage. Wie gross müssen die den mechanischen Faktoren entsprechenden elektrischen Faktoren sein, um das Rahmensystem mit der benötigten Leistungsfähigkeit auszustatten?

Lösung. In erster Linie ist die Drehkraft in Kilogrammen auszurechnen. Nach der auf Seite 53 zusammengestellten Tabelle der gleichwertigen Zahlen entsprechen 2 P-S 150 kgrm. Bei der Rahmenbreite von 15 cm und der minutlichen Umdrehungszahl 1000 des Rahmens, lässt sich die Drehgeschwindigkeit des Systems mit Hülfe der auf Seite 130 stehenden Formel ziffernmässig ermitteln und zwar beträgt dieselbe $\frac{1000}{60} \times \pi \times 0{,}15 = 7{,}85$ m. Indem die kgrm durch die Geschwindigkeit in m geteilt werden, resultirt aus dem Quotienten die gesuchte Drehkraft. Sie beträgt in dem vorliegenden Fall $\frac{150}{7{,}85} = 19{,}1$ kgr. Mit der Kenntniss dieser Zahl lässt sich aus der entsprechend umgestellten ersten Hauptformel und Einsetzung der gegebenen Zahlenwerte an Stelle der Buchstaben die benötigte Stromstärke feststellen. Ihre Ampèrezahl ergibt sich aus dem Quotienten $\frac{19{,}1 \times 9810000}{1{,}274 \times 8000 \times 250 \times 20}$ zu 3,68. In analoger Weise kann e aus dem Quotienten der zweiten Hauptformel errechnet werden. Danach ist die erforderliche Überspannung $\frac{1000 \times 8000 \times 250 \times 20 \times 15}{15 \times 10^8}$ oder 400 Volts. Werden die Ampères mit den Volts vervielfacht, so wird damit die elektrische Leistung erhalten. Sie beträgt 1472 Watts. Diese Ziffer kann als Kontrole für die richtige Feststellung von S und e dienen. Entsprechen nämlich diese Grössen der benötigten Leistungsfähigkeit, so muss nach der

Tabelle der gleichwertigen Zahlen $\frac{1472}{736}$ gerade 2 P-S ausmachen, was thatsächlich der Fall ist. Um ausser e auch die erforderliche Stromquellenspannung E kennenzulernen, muss der Ohmsche Widerstand des Rahmensystems nebst dem der Zuleitungen ermittelt werden. Wird angenommen, dass er insgesammt gerade 1 Ω ausmacht, so lässt sich damit der Spannungsabfall ausrechnen. Er ist $3{,}68 \times 1 = 3{,}68$ Volts. Die obigen 400 Volts und diese 3,68 Volts ergeben zusammengezählt die Stromquellenspannung. Was bei der Lösung der gestellten Aufgabe bisher unberücksichtigt geblieben ist, das ist die Thatsache, dass keine Energieumformung ohne gleichzeitiges Auftreten geringer Mengen von Energiearten, welche nicht beabsichtigt sind, möglich ist. Es muss deshalb eine grössere elektrische Leistung als 1472 Watts zur Hervorbringung der 2 P-S mechanischer Leistung aufgewandt werden. Die Berechnung dieser Mehrleistung erfordert die Kenntniss des Wirkungsgrades der Rahmenanordnung. Wird derselbe zu 0,8 angenommen, so ist die gesammte elektrische Leistung $\frac{1472}{0{,}8} =$ 1840 Watts. Von den beiden elektrischen Faktoren wird hiebei lediglich die Stromstärke entsprechend vergrössert; e bleibt, da n nach wie zuvor der Zahl 1000 zu entsprechen hat, konstant. Die geänderte Stromstärke ergiebt sich aus dem Quotienten $\frac{1840}{400}$ zu 4,6 A.

Nachdem die Abhängigkeitsverhältnisse der bei der Umformung der elektrischen in mechanische Energie beteiligten Grössen bezw. Faktoren genügend klargelegt sind, ist es auch hier ein Leichtes, den Energieumwandlungsprozess in seiner Gänze zu erfassen und auf seine spezielle praktische Bedeutung zu untersuchen. Diese Bedeutung ist, je nach der Voraussetzung, welche an das Verhalten einzelner Grössen geknüpft wird, sehr verschieden geartet. Es entspricht dem Zweck des Buches, hier nur die wichtigsten Gleichgewichtssysteme der wandernden Energie zur Sprache zu bringen und so namentlich zwei in eingehender Weise darzustellen.

Bei dem einen System wird von der Annahme ausgegangen, dass die zur Verfügung stehende elektrische Energie, wie deren jeweilige Inanspruchnahme in quantitativer Hinsicht auch beschaffen sein mag, mit einem möglichst gleichbleibenden Spannungsfaktor ausgestattet sei. Ausserdem wird noch vorausgesetzt, dass die Mengenverhältnisse der gleichartigen Faktoren immer konstant sind. Zur Einhaltung der ersten Bedingung kennt die Elektrotechnik Mittel und Wege genug; und was die letztere anbetrifft, so wird ihr nachgekommen, wenn das stromdurchflossene Rahmensystem seine Umdrehungen in einem Spaltfeld von unveränderlicher Stärke vollzieht. Die Elektrotechnik hat in dem sogenannten Nebenschluss-Elektromotor eine maschinelle Einrichtung geschaffen, welche, wenn sie mit einer Stromquelle von konstanter Anschlusspannung verbunden wird, in vorzüglicher Weise ein Umwandlungsspiel der Energie von der angedeuteten Art gestattet. Als äussere Veranlassung zu einer Mengenänderung der äquivalenten elektrischen und mechanischen Energie kommt lediglich der von der Drehkraft zu überwindende, mechanische Widerstand in Frage. Mit seiner Änderung erfolgt zunächst eine solche Änderung der Rahmenstromstärke, dass die durch sie und das Spaltfeld veranlasste Drehkraft dem Widerstande numerisch gleich wird. Die geänderte Stromstärke hat einen andern Spannungsabfall $S \times W$ zur Folge, so dass die Differenz zwischen diesem und der Anschlusspannung, also die der Geschwindigkeit gleichartige Überspannung, ihre Grösse nicht mehr beibehalten kann, sondern sie ebenfalls, wenn auch im entgegengesetzten Sinn wie der Spannungsabfall, entsprechend abändern muss. In demselben Verhältniss erfährt natürlich auch, gemäss der zweiten Hauptformel, die Tourenzahl eine Umformung. Ein grösser werdender mechanischer Widerstand verursacht demnach eine grössere Stromstärke und Drehkraft; die grössere Stromstärke bewirkt einen grösseren Spannungsabfall und dieser eine kleinere Überspannung und Umdrehungszahl. In den Fällen, in welchen der elektrische Widerstand des Rahmensystems sehr klein und die zur Verfügung stehende, konstante Anschlusspannung verhältnissmässig gross angenommen wird — und diese Annahme ist in den meisten praktischen Fällen zulässig — kann der Spannungsabfall $S \times W$ immer nur einen geringen Teil der Gesammt-

spannung ausmachen und sich, selbst bei erheblichen Stromstärkeveränderungen, nur wenig in seinem Ziffernbetrag umwandeln. Aus diesem Umstand folgt die überaus wichtige Thatsache, dass die Überspannung e und somit auch die Tourenzahl n praktisch als konstant angesehen werden können. Ein unter konstanter Anschlusspannung stehender Nebenschlussmotor hält demnach bei den verschiedensten Belastungen eine angenähert gleichbleibende Umdrehungszahl ein, ohne dass er hiezu, wie z. B. die Dampfmaschine, besonderer Regulirvorrichtungen bedarf. Für sehr weitgehende Ansprüche in Bezug auf unveränderliche Umdrehungsgeschwindigkeit, ist allerdings die Selbstthätigkeit des Elektromotors nicht ausreichend. Es bedarf noch geeigneter äusserer Einwirkungen, deren zwei, am meisten in Anwendung gekommenen Arten nachstehend gestreift sein mögen. Beide benötigen zur Erzielung der beabsichtigten Wirkungen elektrischer Widerstände, welche durch ihre richtige Ein- und Ausschaltung entweder eine Abänderung der Anschlusspannung, oder eine solche der Spaltfeldstärke verursachen. Aus der zweiten Hauptformel lässt sich erkennen, dass eine Änderung sowohl von e, als auch von $\mathfrak{B}$ eine Beeinflussung von n im Gefolge hat; dass somit beide Mittel zur genauen Regulirung auf gleichbleibende Tourenzahl thatsächlich geeignet sind.

Bei dem zweiten Gleichgewichtssystem ist die sich in mechanische Energie umwandelnde elektrische Energie ebenfalls mit einem konstanten Spannungsfaktor ausgerüstet anzunehmen. Die Mengenverhältnisse der gleichartigen Faktoren sollen jedoch nicht gleichbleibend sein, sondern sich mit dem zu überwindenden mechanischen Widerstand verändern. Diese Forderung kann nur eingehalten werden, wenn das Rahmensystem in einem Spaltfeld rotirt, dessen Feldstärke für die verschiedenen umgeformten Energiemengen verschieden gewertet ist. In der Elektrotechnik ist der mit einer Stromquelle von konstanter Anschlusspannung verbundene, sogenannte Serienmotor als eine maschinelle Einrichtung bekannt, welche ein derartiges Verhalten der Leistungsfaktoren und der Spaltfeldstärke bedingt. Da bei einem derartigen Motor die Rahmenstromstärke gleichzeitig für die Grösse der Spaltfeldstärke ausschlaggebend ist, so geht daraus hervor, dass der jeweils vorhandene und zu überwindende mechanische

Widerstand das Auftreten eines solchen Quantums fliessender Elektrizität veranlassen wird, dass dessen Stromstärke und die hervorgebrachte Feldstärke, in Verbindung mit der ersten Hauptformel, gerade den Widerstand ausmachen. Insofern eine grosse Stromstärke auch eine verhältnissmässig grosse Feldstärke nach sich zieht, ist in einem derartigen Umformungssystem mit der Feldstärke ein Mittel gegeben, um hohe Drehkraftbeträge mit verhältnissmässig beschränkten Stromstärken und — wie sich noch zeigen wird — auch mit solchen elektrischen Leistungen ins Leben zu rufen. Die den mechanischen Widerständen entsprechenden Umdrehungszahlen sind der zweiten Hauptformel zu entnehmen. Die Überspannung wird auch hier, selbst bei hohen Stromstärkebeträgen, der Anschlusspannung recht nahe bleiben, mithin einen angenähert konstanten Charakter besitzen. Dessen ungeachtet unterliegt die Tourenzahl sehr starken Schwankungen, und zwar rühren diese von der erheblich variabeln Spaltfeldstärke her. Je grösser diese ist, desto weniger Touren hat das Rahmensystem auszuführen, um die der angenähert konstanten Überspannung gleiche Gegenspannung zu induziren und umgekehrt. Da sich bei einem Serienmotor eine z. B. grosse Spaltfeldstärke stets in Begleitung einer ebenfalls grossen Stromstärke befindet, so resultirt hieraus das charakteristische Wirkungsprinzip dieser Motorengattung, welches darin besteht, dass sie grosse Widerstände mit wenigen Touren und kleine Widerstände mit vielen Touren überwindet. Diese letztere Thatsache kann für das Rahmensystem unangenehme Folgen zeitigen, insofern die Tourenzahl bei sehr erheblich kleinen mechanischen Widerständen unter Umständen solche Dimensionen annimmt, dass die Schwungkraft den Verband der Rahmen unter sich und mit dem Drehmechanismus löst. Diese hier geschilderte Art der Energieumformung kann nur vorsichgehen, so lange die Stromquelle in der Lage ist, eine Stromstärke herzugeben, deren Drehkraft dem zu überwindenden Widerstand gleichkommt. Ist dies nicht mehr der Fall, so hört das Rotiren des Rahmensystems und mithin auch das Umwandeln der elektrischen Energie in mechanische auf. Der Stromkreis erzeugt lediglich Wärme.

Nachdem die bei der Umwandlung von mechanischer in elektrische und von elektrischer in mechanische Energie statt-

habenden Vorgänge in ihren charakteristischen Einzelheiten und deren Zusammenwirken dem Leser geschildert wurden, ist es jetzt an der Reihe, auch jenen Problemen näherzurücken, welche die Übertragung der elektrischen Energie von einem Stromkreis auf einen andern zum Gegenstand haben. Die Möglichkeit einer derartigen Übertragung ist an das Vorhandensein von Wechselströmen gebunden und kündet sich nach aussen durch die induzirende Fähigkeit derselben an. Auf Seite 135 bis auf Seite 144 wurden die Entstehungsbedingungen der durch ein variirendes elektromagnetisches Wirbelfeld veranlassten elektromotorischen Kräfte festgestellt und ausserdem, mit Zuhilfenahme des Drahtrahmenschemas, das Quantitätsgesetz dieser Kräfte abgeleitet. Die Mengenbeziehung wurde nicht nur für beliebige Phasen eines beliebigen Wellenspieles des Wirbelfeldes, sondern auch für die effektiven Phasen bei Sinuskurvenform ermittelt. Sind der Drahtrahmen der Fig. 46 oder eine Drahtspirale zu einem geschlossenen Stromkreise ausgebaut, so werden die induzirten Spannungen Elektrizität zum Fliessen bringen und in Folge dessen Arbeit leisten. Diese Arbeit kann nicht aus Nichts hervorgehen, sondern das ihr entsprechende Energiequantum muss ohne Zweifel zunächst dem Wirbelfeld entstammen. Dieses Feld nimmt aber die Energie auch nicht aus sich selbst heraus, vielmehr verdankt sie dieselbe jenem Stromkreis, welcher die Ursache des Wechselfeldes ist. Es kann für das vorliegende Problem nur der Teil des Stromkreises besonderes Interesse beanspruchen, welcher speziell an der Feldbildung beteiligt ist. Dieser Teil muss, gemäss den Entwicklungen des Abschnitts III, aus einer Drahtspule bestehen, welche auf den Eisenring geschoben und mit ihren Leiterenden in den Stromkreis eingeschaltet wird. Ein mit zwei Leiterspiralen versehener Eisenkern kann daher als der typische mechanische Aufbau bei Übertragungen elektrischer Energie angesehen werden. Von diesen zwei Leiterspiralen steht die eine mit einer Stromquelle und die andere meistens mit einem oder mehreren Nutzapparaten in Verbindung. Um Betrachtungen über die Wanderung der Wechselstromenergie möglichst übersichtlich zu gestalten, ist es allgemein üblich geworden, alle Teile und Grössen, welche mit der Stromquellenseite in Zusammenhang stehen, als primäre und alle die, welche sich mit

den Nutzapparaten kombiniren, als sekundäre zu bezeichnen. Kommen zur Abkürzung Buchstabenbezeichnungen für Grössen in Anwendung, so sollen sie, wenn diese dem primären Kreis angehören, unten die Ziffer 1, hingegen wenn dem sekundären Kreis, die Ziffer 2 erhalten. Wo demnach z. B. die Bezeichnung $\mathfrak{B}_1$ oder E_1 oder S_2 angeführt ist, ist darunter die primäre elektromagnetische Feldstärke, oder die primäre Anschlusspannung, oder endlich die sekundäre Stromstärke zu verstehen. Da dieser eisengeschlossene Spulenapparat die erst später richtig zu begreifende Eigenschaft besitzt, die Faktoren der elektrischen Energie quantitativ beliebig umzuwandeln, so führt er in der Praxis überall die Bezeichnung Umformer, oder bei Solchen, die sich gern mit fremden Federn schmücken, die Benennung Transformator.

Ehe dem Übertragungsproblem näher getreten wird, sei bereits hier einer Nebenerscheinung in den eisenerfüllten Drahtspiralen gedacht, welche dasselbe in seiner Übersichtlichkeit wesentlich beeinträchtigt und welche für den Wechselstrom sehr charakteristisch ist. Aus den bisherigen Entwicklungen ging hervor, dass eine von Wechselströmen durchflossene Leiterspirale ein Wechselfeld erzeugt, das in einer von ihm durchsetzten zweiten Spirale Induktionsspannungen veranlasst. Es ist nun der Gedanke sehr naheliegend, dass, wenn ein Wechselfeld in einer fremden Spirale Spannungen hervorbringen kann, es auch solche in seiner eigenen produziren wird. Thatsächlich ist dieser Gedanke zutreffend; ein passend angelegter Versuch liefert ohne Weiteres den Nachweis dieser selbstinduzirenden Fähigkeit einer wechselstromdurchflossenen und eisenerfüllten Leiterspirale. Wenn somit das Wechselfeld sowohl in der primären, als auch in der sekundären Spirale Induktionsspannungen ins Leben ruft, so werden diese beiden Spiralen durch die Spannungen zum Sitze von Arbeitsleistungen werden. Während aber die Spannung in der sekundären Spirale dauernd Widerstandsarbeit verrichtet, mithin der primären Stromquelle dauernd Energie entnimmt, leistet die Spannung der Selbstinduktion, wie später bewiesen werden wird, innerhalb einer Periode ebensoviel Bewegungs- wie Widerstandsarbeit. Es wird demnach dem Stromkreis ein bestimmtes Energiequantum abwechselnd entzogen und zugeführt,

so dass die Folge der Selbstinduktion in keiner Dauerbeanspruchung von Energie, sondern in einer Beeinträchtigung der Ausnützungsfähigkeit des induzirenden Stromkreises und in einer komplizirteren Gestaltung der bei dem Umformer statthabenden Vorgänge besteht. Es mag gleich an dieser Stelle darauf hingewiesen sein, dass in dem verschiedenen Verhalten der beiden induzirten Spannungen ein gewichtiger Grund zum Ausdruck kommt, für das Entstehen derselben verschiedenartige mechanische Vorgänge anzunehmen. Soll der Leser einen möglichst klaren Einblick in die Mannigfaltigkeit der qualitativen und quantitativen Erscheinungen, welche bei der Energiewanderung durch Wechselströme in Wirksamkeit treten, erhalten, so ist eine Zerlegung des Gesammten in einzelne, nur Zusammengehörendes umfassende Teile von grossem Vorteil. Solche Teile machen namentlich die Wirkungen der Selbstinduktion und die der Induktion in einer fremden Spule aus; beide werden im Nachstehenden zunächst als völlig getrennt auftretende Vorgänge zur Darstellung gebracht. In den darauffolgenden Schlussentwicklungen wird alsdann durch die passende Vereinigung bekundet, dass die beiden in Ursache und Wirkung verschiedenen Induktionserscheinungen stets gemeinsam aufzutreten pflegen. Hätten sich die traditionellen Lehrbücher in ihren Darlegungen aufs konsequenteste an dieses Prinzip der getrennten Behandlung des Gesammtvorganges gehalten, so würde die richtige Wesenserfassung des Wechselstromumformers keine derart Zeit und Gedanken raubende Thätigkeit geworden sein, wie sie es heute thatsächlich ist. Im Nachstehenden soll in erster Linie die durch die induzirte Sekundärspannung veranlasste dauernde Energiewanderung einer eingehenderen Betrachtung unterzogen werden.

Das was bisher über die Induktion durch Wechselströme festgestellt wurde, gipfelte in der Erkenntniss, dass das von dem primären Strom hervorgebrachte und in seiner Wirbelgeschwindigkeit sich ändernde elektromagnetische Ringfeld in der sekundären Spirale Induktionsspannungen erzeugt, welche in ihrer Gesammtheit Wellengebilde von derselben Periodenzahl, wie sie die primäre Anschlusspannung besitzt, ergeben. Für die spezielle Änderungsweise der elektromagnetischen Feldstärke im Sinusverhältniss resultirte, laut Seite 140, eine um $^1/_4$ Periode in den Phasen ver-

schobene Sinuswelle der Induktionsspannungen. Wird der sekundäre Stromkreis geschlossen, so veranlassen diese Spannungen ein Fliessen von Elektrizität. Das Ohmsche Produkt Sekundärspannung $\times$ Sekundärstromstärke oder, was gleichbedeutend ist, das Produkt $E_2 \times S_2$ ist der mathematische Ausdruck für die dadurch in den einzelnen Zeitpunkten entstehenden elektrischen Leistungen. Die diesen Leistungen äquivalenten Energiemengen können, der Natur des Gesammtvorganges entsprechend, nur aus dem primären Stromkreise übertragen worden sein. Diese Annahme bedingt das Vorhandensein einer den sekundären Leistungen entsprechenden elektrischen Rückwirkung auf den primären Stromkreis. Über die Beschaffenheit dieser Rückwirkung gibt schon ein einfaches Experiment wichtige Andeutungen. Wird nämlich die primäre Stromstärke bei geöffnetem sekundärem Stromkreis gemessen, so zeigt sich, wenn von der Selbstinduktion abgesehen wird, dass dieselbe dem Ohmschen Quotienten $\frac{E_1}{W_1}$ entspricht. Wird jedoch der Sekundärkreis geschlossen, kommt es also in diesem zu elektrischen Leistungen, so lässt das Stromstärke-Messinstrument nur noch eine primäre Stromstärke erkennen, welche k l e i n e r als der Ohmsche Quotient ist. Diese Verkleinerung von S_1 ist lediglich dadurch zu erklären, dass der stromdurchflossene Sekundärkreis eine primäre Gegenspannung hervorruft, welcher die primäre Anschlusspannung in erster Linie das Gleichgewicht zu halten hat, und dass somit nur noch der Rest der Anschlusspannung zur Strombildung disponibel ist. Die Existenz dieser gemutmassten Gegenspannung wird ausser allem Zweifel gestellt, wenn die Vorgänge bei der Energieproduktion im sekundären Stromkreise etwas näher ins Auge gefasst werden. Es werden daselbst die in ihren Änderungen Wellen gleicher Periodengrösse bildenden Induktionsspannungen auch bei den zugehörenden Stromstärken Wellenspiele verursachen. Die fliessende Elektrizität in der Sekundärspule muss, analog wie die der Primärspule, ein zweites elektromagnetisches Wirbelfeld in dem Eisengestell hervorbringen. Die Möglichkeit, dass in ein und demselben Raume zwei und noch mehr Felder nebeneinander bestehen können, wurde bereits im Abschnitt III, und zwar an Feldern rein elektrischer Natur, dargelegt. Da die

Grösse der Stromstärke auf die Feldstärke von Einfluss ist und dieselbe fortwährend einen andern Umfang annimmt, so folgt daraus, dass auch das sekundäre elektromagnetische Wirbelfeld in seinen Feldstärkenphasen Wellenbildungen ermöglicht. Die Kraftlinien des Sekundärfeldes liegen sowohl innerhalb der sekundären, als auch der primären Spirale. Es sind demnach alle Vorbedingungen gegeben, um, gemäss dem allgemeinen Entstehungsgesetz der Induktion. die Notwendigkeit des Auftretens von Induktionsspannungen in dem primären Stromkreis darzuthun. Mit dem Nachweis der Existenz primärer Induktionsspannungen ist aber die gestellte Aufgabe erst zur Hälfte gelöst; es bleibt noch zu zeigen, dass diese Spannungen für alle Phasen der primären Anschlusspannung Gegenspannungen bedeuten. An der Hand der Fig. 46 lässt sich auch hierüber Klarheit schaffen. Es möge in derselben durch die Pfeile die Kraftlinienrichtung des primären Feldes markirt sein. Aus dieser Richtung ergibt sich für ein ihr folgendes Auge eine Zirkulation des primären Stromes in der Bewegungsrichtung eines Uhrzeigers (Siehe die Regel auf Seite 70). Ist die Änderungstendenz des Primärfeldes in dem herausgegriffenen Zeitpunkt aufs Erhöhen angelegt, so ergibt sich die Richtung der in dem Drahtrahmen induzirten Sekundärspannung aus der Gedächtnissregel der Seite 137. Sie ist dem Bewegungssinn des Uhrzeigers entgegen. In derselben Richtung, in welcher die Spannung induzirt wird, fliesst auch der Sekundärstrom. Ein derart gerichteter Strom muss, nach der Regel auf Seite 70, ein Wirbelfeld hervorrufen, dessen Kraftlinien denen des Primärfeldes entgegen weisen. Da die Fig. 48 zur Anschauung bringt, dass das Anwachsen der Feldstärke ein Abnehmen der induzirten Spannung und umgekehrt zur Folge hat, so lässt sich hieraus für die sekundäre Spannungs-. Stromstärke- und Feldstärke-Phase ein aufs Vermindern gerichtetes Änderungsbestreben ableiten. Diese Änderungsart und die Kraftlinienrichtung des Sekundärfeldes ergeben endlich mit Hülfe der Regel auf Seite 137 einen Richtungssinn für die primäre Induktionsspannung, welcher thatsächlich dem der primären Anschlusspannung entgegenweist. Um diese beiden Spannungen auch bei der abgekürzten Bezeichnungsweise in Buchstaben von einander unterscheiden zu können, werde die Induktionsspannung

mit e_1 bezeichnet. Die Anschlusspannung findet, wie bereits im Voraufgehenden gehandhabt, durch E_1 ihren Ausdruck. Das Auftreten einer elektrischen Rückwirkung des induzirten und stromdurchflossenen Stromkreises gilt nicht nur für das Schema der Fig. 46, sondern überall, wo Induktion durch Wechselströme in fremden Stromkreisen in Erscheinung tritt. Es bildet für diese Induktionsart ein Gesetz von grosser Bedeutung und verkörpert das zweite Analogon zum Lenzschen Gesetz. Die Fassung, in welcher dieses Gesetz zum Ausdruck gelangen kann, ist etwa die folgende: *Wo immer eine Induktion durch Wechselströme in einem fremden Stromkreis eingeleitet wird, verursacht der induzirte Strom das Entstehen von Induktionsspannungen, welche der die Wechselströme hervorbringenden Spannung entgegenwirken und von dieser überwunden werden.* Dass die in dem primären Stromkreis induzirte Spannung der Anschlussspannung stets entgegengerichtet ist, lässt sich übrigens, ausser an dem in einem herausgegriffenen Zeitpunkt vorhandenen Phasenwerten, auch an der Gesammtheit der Phasen, also an den Wellen, nachweisen. Besonders einfach und übersichtlich gestaltet sich dieser Nachweis, wenn für die E_1-Welle Sinusform angenommen wird. Denn dann müssen, wie später noch nachgewiesen werden wird, die $\mathfrak{B}_1$-, E_2-, $\mathfrak{B}_2$- und e_1-Wellen ebenfalls in Sinusgestalt erscheinen. Die E_1-, S_1- und $\mathfrak{B}_1$-Wellen einerseits und die E_2-, S_2- und $\mathfrak{B}_2$-Wellen anderseits überdecken sich mit gleichartigen Phasen; während zwischen denen der beiden Wellengruppen eine Verschiebung von $^1/_4$ Periode besteht (Siehe Fig. 48). Ebenso besteht zwischen den übereinstimmenden Phasen von der $\mathfrak{B}_2$- und der von ihr induzirten e_1-Welle eine Verschiebung von $^1/_4$ Periode und zwar in derselben Richtung der Zeitlinie, wie bei dem ersten Viertel. Daraus resultirt aber für die E_1- und e_1-Welle eine Phasenverschiebung von $^1/_2$ Periode. Werden diese beiden Sinuskurven zeichnerisch dargestellt, so zeigt sich, dass gleichartige Phasen zwar in denselben Zeitpunkten liegen, aber sich in entgegengesetzten Richtungen zur Zeitlinie ausdehnen. Die von ihnen repräsentirten Spannungen wirken somit einander fortwährend entgegen. Dieser an Sinuskurven gelieferte Richtungsnachweis ist auch für andersgestaltete Wellen anwendbar. Allerdings verliert er bei diesen an Einfachheit; führt aber immerhin

zu demselben Endresultat. Als Abschluss des Vorstehenden möge auch dieses Mal eine kurze Zusammenfassung der bei der Energieübertragung durch Wechselströme vorsichgehenden qualitativen Prozesse platzgreifen. Steht in einem primären Wechselstromkreise ein Quantum elektrischer Energie zur Verfügung, so wird dasselbe ein Wirbelfeld erzeugen, deren Phasen Wellen gleicher Periode ausmachen. Befindet sich in diesem Felde ein passend gelagerter sekundärer Stromkreis, so werden in diesem durch das Wirbelfeld Induktionsspannungen hervorgerufen, deren Phasen sich ebenfalls zu Wellen zusammenbauen. Ist der sekundäre Stromkreis offen, so haben die Induktionsspannungen keine weiteren Erscheinungen in demselben zur Folge. Die gesammte primär zur Verfügung stehende elektrische Energie wird direkt in Wärme umgewandelt. Ist dieser Stromkreis jedoch geschlossen, so veranlassen die Induktionsspannungen ein Fliessen von Elektrizität und dadurch das Auftreten von sekundärer elektrischer Arbeit. Die die Energieübertragung verursachende Sekundärstromstärke bringt die Rückwirkung auf den primären Stromkreis hervor, indem das von ihr geschaffene Wellenfeld in dem Stromkreis Induktionsspannungen in Thätigkeit setzt, welche der primären Anschlusspannung entgegengerichtet sind. Die Grösse der Widerstandsarbeit, welche sich bei der Überwindung der Induktionsspannungen ergibt, ist der in dem sekundären Stromkreis geleisteten Arbeit nicht nur äquivalent, sondern sogar zifferngleich.

Die elektrischen Leistungen der beiden Stromkreise finden ihren Formelausdruck in den Produkten $e_1 \times S_1$ und $E_2 \times S_2$. Während nun unter $E_2 \times S_2$ stets eine Bewegungsleistung zu verstehen ist, kann $e_1 \times S_1$ sowohl eine solche, als auch eine Widerstandsleistung bedeuten, je nachdem, ob mit e_1 der die induzirte Gegenspannung überwindende Betrag der Anschlusspannung oder die Gegenspannung zum Ausdruck gebracht werden soll. Für die Beurteilung der Leistungsmengen ist die Bevorzugung der einen oder der andern Spannungsart vollständig belanglos; Bedeutung besitzt sie blos für qualitative Untersuchungen. Das Erhaltungsgesetz der Energie führt in dem vorliegenden Umformungsvorgang zu einer Gleichheit der beiden Produkte, also zu der Gleichsetzung:

$$e_1 \times S_1 = E_2 \times S_2.$$

Diese Gleichsetzung bildet den Ausgangspunkt für die qualitativen Vorgänge, welche bei der Energieübertragung von einem Stromkreis auf einen andern statthaben. Die Kennenlernung derselben sei Gegenstand des jetzt Folgenden.

Zunächst finde die Bemerkung eine Einschaltung, dass die Faktoren der obigen Energieerhaltungsformel entweder vollkommen beliebig aus den Wellen herausgegriffene, oder die mittleren und effektiven Phasenwerte darstellen können. Wenn die letzten zwei Phasengattungen praktische Verwendung finden sollen, so müssen sie immerhin die Zugehörigkeit zu Wellenformen beanspruchen, welche der Berechnung keine Schwierigkeiten darbieten, also z. B. die zu Sinuswellen. Welche Phasenarten den kommenden Betrachtungen jeweils zu Grunde liegen, erhellt ohne weiteres aus der Beifügung oder der Weglassung der abkürzenden Bezeichnungen für mittel und effektiv. Bei den Betrachtungen über die Umwandlung von mechanischer in elektrische und von elektrischer in mechanische Energie, nahm die Feststellung der gleichartigen Faktoren einiges Nachdenken in Anspruch. Es ergab sich eine enge Verwandtschaft zwischen Spannung und Geschwindigkeit, sowie zwischen Stromstärke und Kraft. Im vorliegenden Energieschema ist die Ermittelung der einander entsprechenden Faktoren eine höchst einfache Angelegenheit, da die Zusammengehörigkeit der Spannungen e_1, E_2 und die der Stromstärken S_1, S_2 sofort ins Auge springt. Während mit Hülfe des Drahtrahmenschemas der Fig. 42 eine verschiedene Gestaltung nicht nur der Grösse, sondern auch der Natur der gleichartigen Faktoren nachgewiesen werden konnte, lässt das Schema der Fig. 46 nur eine solche der Grösse zu. Die qualitativen Leistungen des Wechselstromumformers sind demnach verhältnissmässig bescheidener Natur. Die Erzielung eines im voraus bestimmten Grössenverhältnisses zwischen den gleichartigen Faktoren ist hier wie bei den früheren Anordnungen lediglich Sache der geeigneten Auswahl der technischen Mittel. Ist das Grössenverhältniss des einen Faktorenpaares festgelegt, so ist damit das des andern Paares seiner freien Gestaltung verlustig gegangen. Welchen Zwangswert dieses zweite Paar annimmt, ergibt sich aus einer derartigen Umsetzung der Energieformel, dass aus der Produkten- eine Quotientenform hervorgeht. Der



neue Ausdruck für die Gleichsetzung lautet demnach $\frac{e_1}{E_2} = \frac{S_2}{S_1}$. In gutes Deutsch übersetzt, liefert derselbe eine Wirkungsregel von grossem praktischem Wert. In jedem Wechselstromumformer vollzieht sich die Energie-Übertragung stets in der Weise, dass, wenn z. B. das Mengenverhältniss der Spannungen auf eine Vergrösserung von bestimmtem Ziffernwert angelegt ist, das der Stromstärken eine Verkleinerung von demselben Grössenumfang erfahren muss. Ist z. B. ein Umformer dergestalt beschaffen, dass aus der Primärspannung eine zehnmal kleinere Sekundärspannung hervorgeht, so ist die Primärstromstärke gezwungen, einer zehnmal grösseren Sekundärstromstärke das Gleichgewicht zu halten.

Aus der Energieformel der Seite 174 lässt sich noch eine zweite Form mit Quotienten bilden. Dieselbe besitzt die Gestalt $\frac{e_1}{S_2} = \frac{E_2}{S_1}$. Auch diese Form wird von Bedeutung, wenn die Erinnerung platzgreift, dass die Induktionsspannungen ihr Dasein in letzter Instanz den Stromstärken verdanken, und zwar e_1 der sekundären und E_2 der primären Stromstärke. Denn damit besagt die Gleichsetzung, dass die primäre und sekundäre Stromstärke eines Umformers, wie verschieden gross dieselben auch unter sich sein mögen, in jedem Zeitpunkt in gleichem Maasse an der numerischen Bildung der Induktionsspannungen beteiligt sind. Geht z. B. aus S_2 eine ziffernmässig sechsmal so grosse primäre Induktionsspannung hervor, so muss auch S_1 eine Sekundärspannung produziren, welche dem Sechsfachen entspricht. In dem für beide Quotienten gleichen Mengenverhältniss Sechs ist das Wirkungsresultat sämmtlicher zwischen der fliessenden Elektrizität und der induzirten Spannung eingeschalteten Grössen und Vorgänge verkörpert. Für die richtige Beurteilung und Vorausberechnung des Mengenverhältnisses ist es von grossem Interesse, nicht nur den mathematischen Zusammenbau der Verhältnissgrösse festzustellen, sondern auch zu untersuchen, ob diese Grösse beim Wechsel der Stromstärken einen konstanten oder variabeln Charakter besitzt. Für Wechselströme, deren Wellen von der Sinusform abweichen, lässt sich etwas Derartiges nur schwer oder gar nicht erreichen und zwar schon deshalb, weil die Angabe des

Grössenverhältnisses zwischen der maximalen und der effektiven Stromstärke nicht ohne weiteres durchführbar ist. Da in den kommenden Entwicklungen auch Sinuswellenströme Geltung erlangen, so werden erst bei diesen einige passende Betrachtungen über das Grössenverhältniss zur Einschaltung gelangen.

Die Produkte $e_1 \times S_1$ und $E_2 \times S_2$ sind die Formelausdrücke für die von dem primären in den sekundären Stromkreis übertragenen elektrischen Leistung. Diese beiden Produkte sind in ihren Ziffernbeträgen vollkommen gleich. Die bei der Anschlussstelle der Primärspule gewissermassen in dieselbe eintretende sekundliche Energiemenge ist ohne Zweifel gleich dem Produkt $E_1 \times S_1$; während sich die an der Anschlussstelle der Sekundärspule für den sekundären äussern Stromkreis zur Verfügung stehende elektrische Leistung durch das Produkt $e_2 \times S_2$ bezeichnen lässt, wenn e_2 die Buchstabenabkürzung für die sekundäre Anschlussspannung darstellt. Die Erfahrung lehrt, dass $E_1 \times S_1$ und $e_2 \times S_2$ einander nie gleichen, sondern dass $E_1 \times S_1$ stets grösser als $e_2 \times S_2$ ist. Es geht demnach in dem Umformer ein Teil der zu übertragenden Energie verloren, welcher sich hauptsächlich in einer Erwärmung des Apparates zur Beobachtung bringt und welcher seinen quantitativen Ausdruck entweder in der Differenz $E_1 \times S_1 - e_2 \times S_2$ oder dem Wirkungsgrad $\eta = \frac{e_2 \times S_2}{E_1 \times S_1}$ (siehe Seite 54) findet. Durch welche Ursachen der Energieverlust veranlasst wird, das zu ermitteln ist nur nebenbei Gegenstand dieses Werkchens. Soviel sei aber schon hier bemerkt, dass seine weitgehendste Herabminderung eine der Hauptaufgaben für den Umformer bauenden Elektrotechniker wurde, und dass er sich sowohl auf die primäre und sekundäre Leiterspirale, als auch auf den Eisenkern erstreckt. Es muss demnach bereits $e_1 \times S_1$ kleiner als $E_1 \times S_1$ und $E_2 \times S_2$ grösser als $e_2 \times S_2$ sein und der Leistungsverlust wird somit elektrisch durch den Abfall von E_1 auf e_1 und von E_2 auf e_2 markirt.

Um die quantitative Seite des Übertragungsproblems nutzbringend kennenzulernen, sind nunmehr jene Grössen, welche die induzirten Spannungen hervorbringen, in ihrer Eigenart und in ihrem Wirkungsbereich zu untersuchen. Zum Teil hat diese Aufgabe schon im Eingang des Abschnitts IV ihre Erledigung

gefunden; es ergab sich dort für die in einem beliebigen Zeitpunkt induzirte Spannung die Gleichsetzung $E = \frac{\text{Krümmungsfaktor} \times q \times Z}{10^8}$ und für die effektive Spannung bei einer Sinusfeldwelle diejenige $E_{eff} = \frac{4{,}44}{10^8} \times \sim \times \mathfrak{B}_{max} \times Z \times q$. Beide Formulirungen besitzen sowohl bei der Induktion von e_1, als auch bei der von E_2-Spannungen, welchen Umfang dieselben auch erreichen mögen, Gültigkeit. Für Umformerberechnungen hat nur die zweite der Gleichsetzungen Bedeutung erlangt und zwar deshalb, weil einmal die effektiven Phasen die Hauptrolle bei Wechselstromerscheinungen spielen, und weil ausserdem der Krümmungsfaktor einer Sinusfeldwelle sich durch ausschliesslich leicht feststellbare und meistens gegebene Grössen ersetzen lässt, welche heissen: $4{,}44 \times \sim \times \mathfrak{B}_{max}$; $4{,}44 \times \sim$ kann als Krümmungsfaktor einer Sinusfeldwelle mit $\mathfrak{B}_{max}$ gleich Eins aufgefasst werden. Die Zahl 4,44 enthält alle Einflüsse, welche von der Kurvenform der Feldwelle ausgehen; ihre in der Elektrizitätslehre übliche Benennung mit Formfaktor ist daher gut erfunden. Wennschon die Ermittlung der Formfaktoren geometrisch einfacher und symetrischer Kurvengebilde eine mathematisch immer lösbare Aufgabe darstellt[1], so hat sich doch nur die des Formfaktors der Sinuswelle als wichtig und unbedingt erforderlich herausgestellt. Bei unregelmässiger Kurvenform der Feldwellen ist die rechnerische Ermittlung der Formfaktoren meistens gar nicht durchführbar. In allen literarischen Produktionen, welche sich mit dem Thema der Energieübertragung durch Wechselströme beschäftigen, wird bei den Betrachtungen und den Berechnungen die manchmal als selbstverständlich hingestellte Voraussetzung eingeführt, dass die Feldwellen und damit auch, gemäss der Figur 48, die Wellen der induzirten Spannungen Sinusgestalt besitzen. Auch im vorliegenden Fall muss das Heil in Sinusfeldwellen gesucht werden,

---

[1] So ist z. B. der Formfaktor einer Feldstärkenwelle
von Dreiecksform . . . . 4,64 (gleichschenklig)
von Halbkreisform 4,26
von Rechtecksform 4,00

denn nur mit diesen bekommen die folgenden Entwicklungen eine anpassungsfähige und übersichtliche Gestalt.

In der Formel $E_{eff} = \frac{4{,}44}{10^8} \times \sim \times \mathfrak{B}_{max} \times Z \times q$ sind vier Grössen enthalten, deren Dimensionirung im Belieben des Konstrukteurs liegt. Allerdings ist hiebei der Grössenbildung von $\sim$, $\mathfrak{B}_{max}$ und q und zwar zum Teil aus technischen, zum Teil aus wirtschaftlichen Gründen eine ziemlich enge Grenze gezogen. Nur der Windungszahl Z kommt eine leichte und unbegrenzte Änderungsfähigkeit zu, von welcher in der Elektrotechnik auch der ausgedehnteste Gebrauch gemacht wird. Bei einem im Betrieb befindlichen Umformer, welcher mit einer Stromquelle von konstanter Periodenzahl in Verbindung steht, ist der Einfluss der Grössen $\sim$, Z und q ein für alle Belastungsverhältnisse gleich bleibender. Eine Variirung der induzirten Spannung ist demnach nur durch die Änderung der Maximalphase der Sinusfeldwelle zu erreichen. Die Maximalphase zu vergrössern bezw. zu verkleinern ist nur möglich, wenn der Strom, welcher in der das Wechselfeld erzeugenden Leiterspirale zirkulirt, eine Vergrösserung bezw. Verkleinerung erfährt. Die Änderung der Stromstärke endlich kann entweder durch eine Widerstandsänderung oder durch eine Vermehrung bezw. Verminderung des den elektrischen Strom hervorbringenden Spannungsanteiles veranlasst werden. Der quantitative Zusammenhang zwischen der Maximalphase der Stromstärke und der der Feldstärke ergibt sich aus der beiderseitig um q gekürzten Gleichsetzung auf Seite 102. Wird diese Gleichsetzung z. B. auf die Primärspule des Umformers angewendet, und die Sekundärspule somit als induzirende aufgefasst, so ist ihre Gestalt die folgende: $\mathfrak{B}_{max_1} = \mu_{\mathfrak{B}_{max_1}} \times 1{,}257 \times \frac{Z_1 \times S_{max_1}}{l}$. Das $\mu_{\mathfrak{B}_{max_1}}$ der rechten Seite repräsentirt die der Maximalphase entsprechende Durchlässigkeit und der Rest dieser Seite die primäre elektrische Feldstärke $\mathfrak{H}_{max_1}$. Wenn das Schmiedeisen der Tafel zwischen den Seiten 86 und 87 als Material zum Aufbau des Eisenkernes angenommen wird, so ist damit der Vorteil erlangt, eine bildliche Darstellung des Änderungsverhältnisses

zwischen den $\mathfrak{H}$- und $\mathfrak{B}$-Phasen gewonnen zu haben. Die $\mathfrak{B}$-Kurve der Tafel ist für die vorliegenden Betrachtungen sehr lehrreich; zeigt sie doch, dass einer Änderung der Maximalphase der Sinusfeldwelle in der Richtung zur Null keine Grenzen gezogen sind, dass es hingegen, selbst bei der Anwendung sehr hoher elektrischer Feldstärken, also auch Stromstärken, nicht möglich ist, die Änderung zum Anwachsen über ein bestimmtes Maass hinauszutreiben, welches im vorliegenden Falle in der Region von ca. 19000 Dynen liegt. Es besteht demnach bei Feldwellen, deren $\mathfrak{B}_{max}$-Phasen hoch beziffert sind, gegen eine Vergrösserung sowohl ihrer selbst, als auch der zugehörenden Induktionsspannungen ein starkes Widerstreben. Aus dem vollständig unproportionalen Zusammenhang zwischen den Stromstärken- und den Feldphasen geht eine weitere und zwar wohl zu beachtende Komplikation hervor. Die Sinusfeldphasen, welche in der Nähe von $\mathfrak{B}_{max}$ liegen, bedürfen unverhältnissmässig grosser und diejenigen, welche dem Nullbereich anliegen, unverhältnissmässig kleiner Stromstärken. Es ist daher ausgeschlossen, dass die Phasen der wirbelfelderzeugenden Stromstärke ebenfalls eine Welle von Sinusform bilden können. Die Stromkurve wird in der Nähe der Zeitlinie eine verhältnissmässig geringe Neigung aufweisen, nach oben jedoch in eine um so längere und schärfere Spitze ausgehen, je grösser $\mathfrak{B}_{max}$ gewünscht wird. Wenn die $\mathfrak{B}$-Kurve der Tafel sich bei dem periodischen Anwachsen und Abnehmen der Stromstärke gleich bleiben würde, so müsste die Stromkurve eine zwar von der Sinusform abweichende, aber immerhin symetrische Gestaltung einhalten. Nun wurde aber auf Seite 90 eine Wirkung der namentlich bei Wechselstromumformern stark ausgeprägten Hysteresis aufgeführt, welche eine Symetrie unmöglich macht. Es heisst dort, dass eine dem Anwachsen der elektrischen Feldstärke entsprechende $\mathfrak{B}$-Kurve in der Tafel stets niedriger liegen muss, als eine aus der Abnahme der elektrischen Feldstärke hervorgehende. Die Folge dieser Verschiedenheit der $\mathfrak{B}$-Kurven besteht in einer Ausbuchtung des ansteigenden und einer Einziehung des abfallenden Teiles der Stromkurve. An der Grösse der Maximalstromphase ändert die Hysteresis nichts, wohl aber bringt sie noch eine Verschiebung auf der

Zeitlinie zwischen der Strom- und der Feldwelle zu Stande. Die Folgen dieser Verschiebung werden erst bei den Betrachtungen über die Selbstinduktion angeführt werden, wie auch erst dort zu der zeichnerischen Wiedergabe der Stromkurve aus der 𝔅-Kurve unter Zuhilfenahme der sogenannten Hysteresisschleife, geschritten werden soll. Der Umstand, dass die Stromwellen in Folge der Durchlässigkeit und der Hysteresis nicht auch Sinuswellen sein können, scheint die Umformerberechnungen verwickelt gestalten zu wollen. Aus der zumeist angenommenen $\mathfrak{B}_{max}$-Phase lässt sich wohl die Durchlässigkeit, $\mathfrak{H}_{max}$ und auch S_{max}, nicht aber der an der Energiebildung beteiligte Faktor S_{eff} ohne Schwierigkeiten bestimmen. Letzteres wäre nur dann möglich, wenn das Grössenverhältniss der Phasen S_{max} und S_{eff} mit ähnlichen mathematischen Hülfsmitteln ermittelt werden könnte, wie das analoge bei Sinuswellen. Werden über diesen Gegenstand Untersuchungen angestellt, so lässt sich eine Thatsache feststellen, welche erfreulicher Weise die im Interesse der Übersicht so wichtige Einfachheit der Betrachtungen nicht im mindesten durchkreuzt. Es zeigt nämlich sowohl die Rechnung als auch die bildliche Darstellung, dass das Grössenverhältniss zwischen der effektiven und der maximalen Phase der Stromwellen, trotz der Verzerrung der letzteren, beinahe dasselbe wie bei Sinuswellen ist. Allerdings setzt dieses Ergebniss voraus, dass die $\mathfrak{B}_{max}$-Phase der den Stromwellen entsprechenden Sinusfeldwellen nicht über das Knie der 𝔅-Kurve hinausgreift. Da nun bei Umformerberechnungen, zur Vermeidung allzu grosser Energieverluste durch Hysteresis, selten hohe Magnetisirungen angewandt werden, so kann demnach zukünftig so operirt werden, wie wenn in den beiden Leiterspiralen Sinuswellenströme zirkulirten. Es können demnach im Energieschema des Wechselstromumformers nicht nur für die Feldstärken und die Induktionsspannungen, sondern auch für die Stromstärken Sinusphasen aufgegriffen werden. Übrigens lehrt die Erfahrung, dass, wenn grosse Strombeträge an der Energieübertragung beteiligt sind, dass dann die Stromwellen auch in Wirklichkeit der Sinusgestalt sehr nahe kommen.

Mit der Gewinnung der Erkenntniss, dass die Annahme sinusartiger Stromwellen erlaubt ist, geht die Möglichkeit Hand in Hand, eine einfache und anwendungsfähige Beziehung zwischen der induzirten Spannung und der induzirenden Stromstärke aufzustellen. Wird in die Gleichsetzung für E_{eff} an Stelle von $\mathfrak{B}_{max}$ der äquivalente Betrag $\mu_{\mathfrak{B}_{max}} \times 1{,}257 \times \frac{Z_1 \times 1{,}41 \times S_{eff}}{l}$ eingesetzt, und S_{eff} auf die linke Seite gebracht, so ist damit die gewünschte Beziehung, gleichzeitig aber auch die auf Seite 176 namhaft gemachte Verhältnissgrösse bereits zusammengebaut. Sie lautet:

$$\frac{E_{eff}}{S_{eff}} = \frac{7{,}87 \times \sim \times Z_1 \times Z_2 \times q}{10^8 \times l} \times \mu_{\mathfrak{B}_{max}}.$$

Diese mathematische Formulirung zeigt, dass zur Bestimmung von E_{eff} aus einem bestimmten S_{eff} eine sehr reichliche Anzahl Faktoren erforderlich sind, die jedoch den Vorteil haben, sich verhältnissmässig leicht bestimmen zu lassen. Aus der Bedeutung der Faktoren und aus der Art ihrer Zusammenstellung lässt sich der Schluss bilden, dass alle Einflüsse, welche im Stande sind, ein kräftiges elektromagnetisches Wirbelfeld zu bilden, auch bei der analogen Gestaltung der induzirten Spannung den Ausschlag geben. In der richtigen Auswahl der Einzelfaktoren zu einem Gesammtbetrag von gewünschter Grösse liegt die Hauptthätigkeit, aber auch Hauptschwierigkeit für den Umformereinrichtungen berechnenden Elektrotechniker. Der rechtsseitige Ausdruck der obigen Gleichsetzung liefert nach vollständiger Ausrechnung eine Zahl, welche nichts anderes sein kann, als die von der Einheit der effektiven Stromstärke induzirte Spannung. Dieser Betrag bildet für die Wechselstromumformer eine gewissermassen spezifische Grösse, welche, mit Ausnahme von $\mu_{\mathfrak{B}_{max}}$ und $\sim$, nur von den mechanischen Details abhängig ist. Um der Wichtigkeit dieser Zahl auch äusserlich Ausdruck zu verleihen, werde ihr der Name Induktionskoeffizient[1]) beigelegt. Da S_{eff} eine

[1]) Zur Vermeidung von Missverständnissen mag hier die Bemerkung platzgreifen, dass das, was für gewöhnlich als Induktionskoeffizient aufgeführt wird, sich nur aus

Skala von Grössenwerten im Energieschema durchlaufen kann, und jede die Durchlässigkeit des Eisenkernes in besonderem Maasse in Anspruch nimmt, so folgt daraus, dass weder $\mu_{\mathfrak{B}_{max}}$ noch der Induktionskoeffizient eine gleichbleibende, sondern eine mit S_{eff} variirende Grösse darstellen. Diese Thatsache lässt sich auch in der Form aussprechen, dass das Mengenverhältniss zwischen der induzirenden Stromstärke und der induzirten Spannung mit der Änderung der zu übertragenden Energie ebenfalls eine Änderung erfährt. Die Abhängigkeit der Induktionskoeffizienten von S_{eff} macht denselben zu einer für praktische Zwecke unbequemen Rechnungsgrösse. Das Auskunftsmittel, das zur Umgehung dieser Erschwerniss gehandhabt zu werden pflegt, besteht darin, den Koeffizienten einfach als konstant zu betrachten. Mit diesem Radikalmittel sind allerdings die mit der Veränderlichkeit verknüpften Schwierigkeiten beseitigt; dafür können aber die berechneten Werte in Wirklichkeit nur angenähert in der gewünschten Höhe auftreten. Es darf unter solchen Verhältnissen nicht Wunder nehmen, wenn in der Entwicklungsperiode der Umformertheorie die Bestrebungen sich hauptsächlich darauf konzentrirten, Mittel und Wege zur Umgehung des variabeln Koeffizienten aufzufinden. In wie weit dies gelungen ist, wird bei den Schlussbetrachtungen über den Umformer kurz dargelegt werden.

Die zwischen der induzirten Spannung und der induzirenden Stromstärke bestehende Grössenbeziehung lässt sich beim Umformer vorteilhaft in Anwendung bringen. Mit ihrer Hülfe kann sowohl die Spannung e_{eff_1} aus S_{eff_2}, als auch die Spannung E_{eff_2} aus S_{eff_1} ermittelt werden. Da das Erhaltungsgesetz der Energie für jeden Zeitpunkt die Gleichheit der Quotienten $\frac{e_{eff_1}}{S_{eff_2}}$ und $\frac{E_{eff_2}}{S_{eff_1}}$

---

einem Teil der obigen Grössen zusammenbaut. Der traditionelle Koeffizient lautet: $\frac{1{,}257 \times Z_1 \times Z_2 \times q}{10^8 \times l} \times \mu_{\mathfrak{B}_{max}}$. Bei den Betrachtungen über die Selbstinduktion werden noch einige Erörterungen zur völligen Klarstellung der Bedeutung des Induktionskoeffizienten Platz finden.

fordert, so folgt hieraus auch die Gleichheit der in den einzelnen Zeitpunkten vorhandenen primären und sekundären Induktionskoeffizienten. Die Stromstärkeneinheit bringt demnach in beiden Umformerspulen dieselbe induktive Wirkung hervor. Die Energiengleichheit ergibt für das Umwandlungsschema den Vorteil, nur einen Induktionskoeffizienten in demselben aufführen zu müssen, welchem die Elektrotechnik die gut gewählte Sonderbezeichnung Koeffizient der gegenseitigen Induktion beilegte. Werden in der Gleichsetzung des primären und sekundären Koeffizienten die beiderseits gleichen Werte weggelassen, so schrumpft dieselbe zu der Form zusammen: $\mu_{\mathfrak{B}_{max\,2}} = \mu_{\mathfrak{B}_{max\,1}}$. Die ziffernmässige Übereinstimmung der primären und sekundären Durchlässigkeit setzt gleiche maximale elektrische Feldstärken voraus und bewirkt, im Verein mit dieser Gleichheit, ebenso diejenige von $\mathfrak{B}_{max_2}$ und $\mathfrak{B}_{max_1}$. Da für beide Wellen der elektromagnetischen Feldstärke Sinusform angenommen wurde, so besagt die Formel $\mathfrak{B}_{max_1} = \mathfrak{B}_{max_2}$, dass diese Wellen nicht nur in qualitativer, sondern auch in quantitativer Hinsicht einander vollständig gleichwertig sind. Dieses Ergebniss ist für den Umformer charakteristisch und hilft es wesentlich mit, die Mannigfaltigkeit der Gesammterscheinungen der theoretischen Behandlung zugänglicher zu machen.

Aus der völligen Identität des primären und sekundären Wirbelfeldes gehen zwei sehr belangreiche Grössenbeziehungen hervor, welche erhalten werden, wenn zunächst an Stelle der gleichen Grössen $\mathfrak{B}_{max_2}$ und $\mathfrak{B}_{max_1}$ die äquivalenten, auf Seite 182 angeführten Ausdrücke eingesetzt werden. Die somit erhaltene, neue Gleichsetzung lautet: $\mu_{\mathfrak{B}_{max\,2}} \times 1{,}76 \times \frac{S_{eff_2} \times Z_2}{l} = \mu_{\mathfrak{B}_{max\,1}} \times 1{,}76 \times \frac{S_{eff_1} \times Z_1}{l}$. Mit der Weglassung der beiderseits gleichen Grössen und bei einer kleinen Umstellung der übrig bleibenden Buchstabenbezeichnungen, resultirt die erste der gesuchten Grössen-

beziehungen und zwar besitzt sie die Form: $\frac{S_{eff_2}}{S_{eff_1}} = \frac{Z_1}{Z_2}$. Da nun im Energieschema $\frac{S_{eff_2}}{S_{eff_1}}$ dem $\frac{e_{eff_1}}{E_{eff_2}}$ entspricht, so ergiebt sich hieraus die zweite Grössenbeziehung $\frac{e_{eff_1}}{E_{eff_2}} = \frac{Z_1}{Z_2}$. Was sich an den neugewonnenen Formulirungen als bedeutsam erweist, ist die Erkenntniss, in den Windungszahlen der beiden Leiterspiralen ein einfaches mechanisches Mittel zur Erlangung beliebiger Grössenverhältnisse zwischen den gleichartigen Faktoren des Energieschemas zu besitzen. Es sind die Windungszahlen lediglich so abzugleichen, dass ihr Quotient dem verlangten Grössenverhältniss der gleichartigen Faktoren entspricht. Wird z. B. e_1 zu 1000 Volts und E_2 zu 100 Volts angenommen, so lässt sich die Umformung von 1000 auf 100 nur erzielen, wenn die primäre Leiterspirale zehnmal mehr Windungen erhält, als die Sekundärspule. Das Stärkenverhältniss der zirkulirenden Ströme ist dabei ein solches, dass S_2 das zehnfache von S_1 ausmacht.

Werden die bisherigen quantitativen Betrachtungen in ihrer Gesammtheit ins Auge gefasst, so lässt sich erkennen, dass ihnen nur dann in allen Teilen Gültigkeit zukommt, wenn die beiden Feldwellen in der Gestalt von Sinuswellen in Funktion treten. Auf der Annahme dieser Kurvenform beruht die Gleichheit der Induktionskoeffizienten und der Feldwellen; aus ihr geht auch das Gesetz der Windungszahlen hervor. Unter diesen Umständen ist die Feststellung der Bedingungen, bei welchen die Feldwellen Sinuskurvenform annehmen, die zunächst wichtigste Betrachtung. Ihre Bewältigung lässt sich mit verhältnissmässig beschränkten Mitteln durchführen und ist zu diesem Zweck auf den Abschnitt I, Seite 19, zurückzugreifen. Dort wurde die längstbekannte Thatsache angeführt, dass eine jede Welle, wie irgend sie auch geformt sein mag, in eine bestimmte Anzahl Unterwellen von zwar verschiedener Periode, aber von durchweg Sinusgestalt zerlegt werden kann. Dieser Fundamentalsatz ist jetzt dahin zu ergänzen, dass,

wenn die Unterwellen durchweg gleiche Perioden aufweisen, die Hauptwelle stets die Gestalt einer Sinuswelle von derselben Periodengrösse haben muss. Die Einschaltung dieser Ergänzung, welche übrigens ebenfalls seit vielen Jahren bekannt ist, ist hier unumgänglich notwendig, denn dadurch wird das Hauptmittel, um dem Verlangten gerecht zu werden, zur Verfügung gestellt. In Hinwendung zum Vorstehenden gestattet nämlich die Ergänzung die Schlussfolgerung, dass eine Anschlussspannung E_1, deren Phasen im Sinusverhältniss variiren, sich an der Überwindung des Ohmschen Widerstandes und der Gegenspannungen nur mit Teilbeträgen bethätigen kann, welche ebenfalls Sinusphasen entsprechen. Wird somit eine E_1-Welle von Sinusform in Verwendung genommen, so hat dieselbe auch Sinuswellen bei dem primären Spannungsabfall e_1 und der Selbstinduktionsspannung — auf die erst später näher eingegangen werden wird — im Gefolge. Auf Seite 141 wurde nachgewiesen, dass nur ein Sinusfeld eine Sinusspannung induziren könne; daraus folgt sowohl für das e_1 induzirende sekundäre als auch für das die Selbstinduktionsspannung hervorbringende primäre Feld die oben eingeführte Gestalt von Sinuskurven. Ausserdem muss die primäre Sinusfeldwelle auch eine E_2-Welle mit Sinusphasen ins Leben rufen. Die auf Seite 173 vorweggenommene Bemerkung, dass die E_1-, e_1-, $\mathfrak{B}_1$-, $\mathfrak{B}_2$- und E_2-Phasen Sinuskurven bilden, findet somit ihre Bestätigung. Mit diesen wenigen Sätzen ist die Betrachtung über die zur Erlangung von Sinusfeldwellen erforderlichen Bedingungen zu Ende geführt und zwar gipfelt sie in der Forderung der Anwendung primärer Anschlussspannungen, deren Wellen Sinusform besitzen. Da nach dem Vorstehenden auch die primären und sekundären Spannungsabfälle als Phasen von Sinuswellen in Wirksamkeit treten müssen, so ist damit die Forderung sinusartiger Stärkeänderungen auch auf die induzirenden Stromstärken auszudehnen. Sinusstromwellen sind aber, wie bereits dargelegt wurde, in Wirklichkeit höchstens angenähert erreichbar; in vielen Fällen ist sogar eine sehr beträchtliche Abweichung von dieser Kurvenform vorhanden. Die thatsächlichen Verhältnisse verlangen demnach gerade das Gegenteil und zwar Spannungsabfallwellen, welche den verzerrten Stromwellen ähnlich sind. Streng genommen können daher eine sinusartige E_1-Welle und eine



ebenso gestaltete Feldstärkenwelle gar nicht gleichzeitig im Umformer auftreten. Wenn sich die obige Darlegung in theoretischen Betrachtungen dennoch volle Daseinsmöglichkeit zu verschaffen wusste, so ist dies dem Umstand zu verdanken, dass die Spannungsabfallphasen selten eine derartige Grösse annehmen, dass sie die Sinuswellenform der E_1- bezw. $\mathfrak{B}$-Phasen merklich ändern könnten.

Hiemit wäre auch die quantitative Seite der bei der Induktion durch Wechselströme statthabenden Energieübertragung genügend gekennzeichnet. Es erübrigt noch einige kurze Bemerkungen über den Umformungsprozess in seiner Gänze und zwar hinsichtlich der Art der praktisch wichtigsten Gleichgewichtsbedingung beizufügen. Der Veränderungsantrieb des jeweils im Umformer vorhandenen Gleichgewichtszustandes geht im fraglichen Schema vom sekundären Stromkreis aus und zwar durch Einschieben bezw. Entfernen von Gegenspannungen oder Widerständen im äusseren Stromkreis. Die primär vorhandene elektrische Energie wird so zur Uebertragung herangezogen, dass die Anschlussspanung E_{eff_1} durchgehends einen möglichst gleichbleibenden Charakter wahrt. Aus der Konstanthaltung der primären Anschlussspannung resultirt zunächst die Unveränderlichkeit der von E_{eff_1} zu überwindenden Summe von Gegenspannungen. Als solche kommen hier die durch die Strombildung bedingte und die primäre Induktionsspannung e_{eff_1} in Frage. Werden die beiden Summanden einem quantitativen Vergleiche unterzogen, so zeigen die meisten Gleichgewichtsstadien des Umformerschemas einen recht kleinen Wert bei dem Ohmschen Spannungsabfall, hingegen einen sehr grossen bei e_{eff_1}. Auch kann die effektive Stromstärke schon innerhalb beträchtlicher Grenzen variiren, ehe die entsprechenden, gering bewerteten Spannungsabfälle einen merklichen Grössenunterschied aufweisen. Dieses Faktum gestattet E_{eff_1} und e_{eff_1} bis zu einem gewissen Grad als vollständig gleichwertig anzusehen, so dass auch e_{eff_1} als Konstante gelten kann. Hieraus ist, da nach dem Gesetz der Windungszahlen $E_{eff_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \times e_{eff_1}$ gesetzt werden kann,

weiter der Schluss berechtigt, dass E_{eff_2} ebenfalls von gleichbleibender Beschaffenheit ist. Da ferner zwischen E_{eff_2} und e_{eff_2} dieselben Grössenbeziehungen wie zwischen E_{eff_1} und e_{eff_1} bestehen, so ergibt sich als Schlussglied der Entwicklungsreihe die Übereinstimmung von E_{eff_2} und e_{eff_2}. Das auf der Unveränderlichkeit von E_{eff_1} errichtete Übertragungsschema weist nach allem dem das folgende Hauptwirkungsprinzip auf: Sind die primären und sekundären Ohmschen Spannungsabfälle nur klein, so kann das Grössenverhältniss zwischen E_{eff_1} und e_{eff_2} und das zwischen Z_1 und Z_2 als gleich angesehen werden. Ausserdem ist die sekundäre Anschlussspannung e_{eff_2} so gut wie gleichbleibend beschaffen. In wie weit der Einfluss der unvermeidlichen Selbstinduktion dieses Resultat beeinflussen wird, werden die nachfolgenden Entwicklungen erkennen lassen. Immerhin mag bereits hier die Bemerkung Platz finden, dass wohl quantitiv, nicht aber qualitativ Veränderungen durch die Selbstinduktion zu Stande kommen. Werden die Mengenverhältnisse der gleichartigen Faktoren ins Auge gefasst, so lässt sich ohne weiteres erkennen, dass dieselben, in Folge ihrer Abhängigkeit vom Gesetz der Windungszahlen, ebenfalls der dem Schema eigenthümlichen Tendenz des Gleichbleibens unterworfen sind. Da für die primären und sekundären Spannungswerte so gut wie kein Variiren möglich ist, so kann die Übertragung verschieden grosser Energiemengen nur durch die Stromstärken zum Ausdruck kommen, indem diese sich numerisch entsprechend gestalten. Für die Bewertung der Induktionskoeffizienten, welche im Verein mit den Stromstärken die Induktionspannungen quantitativ bestimmen, ist durch die spezielle Art des Energieschemas ein leicht erkenntlicher Zwang geschaffen worden. Die Koeffizienten können nämlich nur solche Beträge annehmen, welche mit dem jeweiligen S_{eff_2} bezw. S_{eff_1} vervielfacht, die konstante Induktionsspannung e_{eff_1} bezw. E_{eff_2} ergeben.

Die in der Praxis gemachten Erfahrungen ergeben in manchen Fällen eine recht beträchtliche Abweichung von dem erweiterten Gesetz der Windungszahlen. Die Ursache dieses regelwidrigen Verhaltens liegt in dem Umstand, dass die von der sekundären bezw. von der primären Leiterspirale hervorgebrachten Elektrizitätswirbel zum Teil Nebenfelder bilden (siehe Fig. 36), welche für die primäre bezw. Sekundärspule induktiv unwirksam sind. Die Neigung, ein Nebenfeld ins Leben zu rufen, ist schon bei der einzelnen Spule vorhanden; sie steigert sich aber noch wesentlich, sobald zwei Spulen nach dem Prinzip des Umformers in Wirksamkeit treten, da in diesem Fall das gegenseitige Abstossungsbestreben der Elektrizitätswirbel beträchtlich grösser wird. Die Nebenfelder werden zur Veranlassung, dass die wirklich induzirten Beträge für e_1 und E_2 stets kleiner ausfallen, als bei Abwesenheit dieser Felder, womit aber die Ausnutzungsfähigkeit des Umformers eine Beeinträchtigung erfährt. Ausserdem wird die angenommene Gleichheit von $\frac{E_{eff_1}}{e_{eff_2}}$ und $\frac{Z_1}{Z_2}$ recht in Frage gestellt. Es bildet für den Umformer berechnenden Techniker die Aufgabe, jene Mittel aufzusuchen, welche das Auftreten der Nebenfelder nach Möglichkeit verhindern, eine Erfahrung und Überlegung sehr in Anspruch nehmende Angelegenheit.

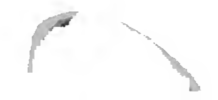
Nachdem das Problem, die Wechselströmen innewohnende Energie mit Hülfe ihrer Wirbelfelder auf fremde Stromkreise zu übertragen, in seinen belangreichen Einzelheiten gekennzeichnet wurde und nachdem die Mittel zur zahlenmässigen Beherrschung desselben in ausreichendem Maass zur Einführung gelangten, ist es nun am Platze, auch jene Erscheinungen in ihren Wirkungen zu untersuchen, welche mit dem Übertragungsvorgang unzertrennlich verknüpft sind und ihn nicht unerheblich kompliziren. Es sind dies in erster Linie die Selbstinduktion und ausserdem namentlich die Hysteresis und die sogenannte Wirbelstrombildung. Mit der Einführung dieser die Umwandlung begleitenden Vorgänge in die Betrachtungen des vorliegenden Abschnittes wird ein Gebiet betreten, welches der Belehrung Suchende herkömmlicherweise als besonders schwer aufschliessbar anzusehen pflegt. Wennschon zugestanden werden muss, dass auf ihm die Aneig-

nung des Wissenswerten mit mehr Schwierigkeiten als sonst verknüpft ist, so ist doch andrerseits nicht wegleugbar, dass die Elektrizitätslehre, in ihrer heutigen Fassung und in der angedeuteten Richtung das Menschenmögliche an olla podrida aufzuweisen hat. Anstatt fremdsprachliche Orgien auf «anzen» aufzuführen und formellen, sowie inhaltlichen Geschmackswidrigkeiten Vorschub zu leisten, wäre es besser gewesen, sich mit den Bearbeitungen möglichst viel an die so gesunden und klaren Prinzipien der Mechanik zu lehnen. Diese hätten eine Haltung ermöglicht, die nicht soviel Chancen besass, zukünftig zum Stichblatt abfälliger Kritik zu werden.

Zunächst mag die Selbstinduktion als die quantitativ ausgeprägtere Erscheinung kennengelernt werden. Es handelt sich bei ihr nicht um Vorgänge, welche sich etwa vom primären in den sekundären Stromkreis erstrecken, sondern um solche, die beiden Stromkreisen in gleicher Weise eigen sind. Es genügt demnach das Schema einer von Wechselströmen durchflossenen Leiterspirale, die auf einem Eisenring befestigt ist. Der Letztere bildet ein unentbehrlicher Bestandteil des Schemas und zwar hat dies seinen Grund in der ausschlaggebenden Rolle des den Stromkreis umgebenden Feldes bei der Selbstinduktion. Alles was dieses Feld sehr kräftig gestalten kann, wie z. B. eben der Eisenkern, wird auch das Eigenartige der Selbstinduktion recht auffallend zum Ausdruck bringen. Um mit den Besonderheiten des neuen Erscheinungsgebietes ins Klare zu kommen, werden auch hier experimentelle Untersuchungen den Ausgangspunkt zu bilden haben. Das Facit derselben knüpft sich an das allgemeine Entstehungsgesetz der Induktion von dem es sogar eine Erweiterung darstellt. Das Allgemeingesetz bringt zum Ausdruck, dass ein Feld, welches seine Wirbelgeschwindigkeit erhöht oder erniedrigt, in einem von ihm durchsetzten fremden Stromkreis Spannungen induzirt, welche solange bestehen bleiben, wie die Feldänderung vorsichgeht und mit dieser verschwinden. Im Anschluss an diesen Wortlaut, besagt das experimentelle Forschungsergebniss weiters, dass nicht nur in einem fremden, stromlosen, sondern auch in dem felderzeugenden und demnach stromdurchflossenen Leiterkreis Spannungen induzirt werden. Im eigenen Stromkreis induzirte Spannungen, nicht Mehr und nicht Weniger, bilden das Charakteristische dessen, was Selbstinduktion

benannt wird. Dieses im Zusammenhang mit einem vollständigen Stromkreis stehende Ergebniss, gilt natürlich schon für mit Selbstinduktion behaftete Stromkreisteile, somit auch für die zum Schema erhobene eisenerfüllte Leiterspirale. Die Wechselströme, welche in derselben zirkuliren sollen, produziren Wechselfelder; diese induziren andauernd Spannungen und beeinflussen andauernd die normalen Vorgänge. Diese Dauervorgänge und nicht etwa die momentaner Feldänderungen sind zum Gegenstand der nachfolgenden Untersuchungen zu machen. Im Interesse der einfacheren und übersichtlicheren Handhabung der gewonnenen Einsichten sollen nachstehende Buchstabenabkürzungen in Verwendung kommen und zwar E für die Anschluss- bezw. Stromquellenspannung, E_s für die Selbstinduktionsspannnug und E_w für den Spannungsbetrag, welcher zur Überwindung des Leiterwiderstandes erforderlich ist. Im Bedarfsfalle sind noch die Indexbezeichnungen eff, $_1$ und $_2$, deren Bedeutung aus dem früheren hervorgeht, beizufügen. Da auch die Selbstinduktion eine Induktion durch Wechselströme repräsentirt, so ist es einleuchtend, dass viele der bereits gewonnenen Resultate ohne weiteres bei dem Vorliegenden Anwendung finden können. Schliesslich sei noch bemerkt, dass alle Arten von Spannungen, welche im Kommenden zur Benutzung herangezogen werden, nicht als Gegenspannungen, sondern als diese überwindende Antriebsspannungen aufzufassen sind. Abweichungen von diesem Prinzip werden jeweils besondere Erwähnung erfahren.

Mit der Erkenntniss, dass das Wesen der Selbstinduktion in der Hervorbringung von Spannungen besteht, ist die zunächst in Angriff zu nehmende Aufgabe klar vorgezeichnet. Sie besteht in der mathematischen Feststellung der in den verschiedenen Zeitpunkten zwischen der Induktionsursache und der erzeugten Spannung vorhandenen Abhängigkeitsverhältnisse. Der Gedankengang, welcher zur Auffindung des Gewünschten einzuschlagen ist, ist derselbe, wie er bei dem Problem der Wechselstrominduktion in Anwendung kam. Er muss demnach ebenfalls zu der bei diesem aufgefundenen mathematischen Formulirungen führen, so dass die Gleichsetzung $E_s = \frac{\text{Krümmungsfaktor} \times q \times Z}{10^8}$ zur



Feststellung beliebiger E_s-Phasen und die Gleichsetzung

$$E_{eff\,s} = \frac{4{,}44}{10^8} \times \sim \times \mathfrak{B}_{max} \times Z \times q$$ zur Ausmittlung der effektiven Phase von Sinusspannungswellen in Benutzung gezogen werden kann. Werden Sinuswellen aufgegriffen, so sind damit nicht nur die Selbstinduktionsspannungen, sondern auch, gemäss Fig. 48, die induzirenden Feldstärken auszustatten; während die Stromstärken, wie bereits dargelegt, in Folge der Hysteresis verzerrte und verschobene Wellen bilden. Zwischen der Welle der Induktionsspannung und der des Feldes ist auch hier eine Phasenverschiebung von $^1/_4$ Periode vorhanden. Da sich schon beim Umformer lediglich die effektiven Phasen von Sinusveränderungen als der praktischen Berechnung zugänglich erwiesen, so gebührt diesen auch beim Problem der Selbstinduktion der Vorrang. Im Interesse der schärferen Hervorhebung des Wesentlichen, soll vorläufig der Einfluss der Hysteresis ausser Acht gelassen werden; dadurch bilden auch die Stromstärken Sinusphasen, die mit den gleichartigen des Feldes auf dieselben Zeitpunkte entfallen. Wird der Widerstand der Leiterspirale als gleichbleibend angenommen, so müssen ausserdem die denselben überwindenden Spannungsphasen eine Sinuswelle bilden, welche mit denen der Stromstärke und dem Felde zeitlich denselben Phasengang besitzt. Diese E_w-Welle ist in der Fig. 50 eingezeichnet. Die gestrichelte Kurve verkörpert entweder die durch die E_w-Phasen veranlasste S-Welle oder die aus dieser hervorgehende $\mathfrak{B}$-Welle:

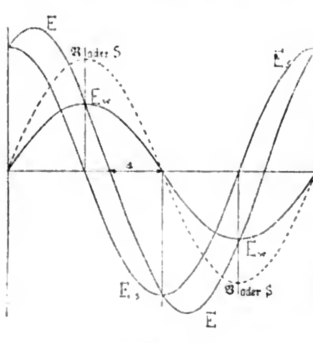


Fig. 50.

Letztere Welle hat die in der Fig. 48 dargestellte, um $^1/_4$ Periode verspätete Kurve der Selbstinduktionsspannungen zur Folge. Den einzelnen Phasen dieser E_s-Welle wird durch gleichgrosse

aber entgegengesetzt gerichtete Beträge der Anschlussspannung das Gleichgewicht gehalten, welche in ihrer Gesammtheit die in der Figur 50 enthaltene und der 𝔅-Welle um ¹/₄ Periode voraus-eilende E_s-Kurve bilden. Werden die den verschiedenen Zeitpunkten der herausgegriffenen Periode zugehörenden E_w- und E_s-Phasen zeichnerisch addirt, so bilden deren Endpunkte die Sinuswelle der Anschlussspannung E, also jener Spannung, welche den Strom S trotz Selbstinduktion und Ohmschen Widerstand ins Leben ruft. Wird die Figur 50 einer genaueren Betrachtung unterzogen, so lassen sich aus derselben zwei für Stromkreise mit Selbstinduktion sehr charakteristische Erscheinungen schlussfolgern. Die in Leiterkreisen mit Selbstinduktion zirkulirenden Ströme sind stets kleiner als der Ohmsche Quotient $\frac{E}{W}$. Ausserdem treten die gleichartigen Phasen der S-Welle um das in der Figur markirte Zeitlinienstück a später als die der Anschlussspannungs- bezw. Stromquellenspannungswelle in Erscheinung, so dass dadurch Zeitmomente mit Strömen, denen nicht nur die Antriebskräfte fehlen, sondern die sogar noch Gegenspannungen überwältigen können, möglich werden. Also nicht das Auftreten der die Strombildung beeinträchtigenden Selbstinduktionsspannung an sich, ist hier das Bedeutsamste — denn derartige Gegenwirkungen treten z. B. auch in Stromkreisen mit Motoren, Akkumulatoren, Bogenlampen u. s. w. auf — sondern deren gleichzeitig phasenverschiebende Wirkung bei der Stromstärke und Spannung. Die rechnerische Ermittlung der effektiven Stromstärke und die des Verschiebungsstückes a, wie überhaupt die Aufstellung der wertvolleren mathematischen Beziehungen zwischen den Hauptgrössen eines Stromkreises mit Selbstinduktion ist wohl das, was zunächst am meisten interessiren dürfte. Die in Figur 50 zwischen den verschiedenen Sinuswellen vorhandenen Verschiebungen gelten nicht nur für die Gesammtheit der Phasen, sondern ebenso für die einander entsprechenden Einzelphasen, also auch namentlich für die effektiven Phasen. Bei der Feststellung der letzteren soll neben den rein mathematischen Entwicklungen eine bildliche Darstellung der verschiedenen Grössen-



beziehungen platzgreifen, welche die vorliegende Aufgabe wesentlich einfacher, kürzer und übersichtlicher zu lösen gestattet und nur die gewünschten Sondergrössen, also nicht wie bei den Kurvenzeichnungen eine Gesammtheit von gleichartigen Werten, verkörpert. Die Quintessenz dieser Verbildlichung besteht darin, dass die zeitlichen Verschiebungen nicht als gerade Linien, sondern als Winkel zum Ausdruck gelangen und zwar sollen dabei 360 Winkelgrade dem Zeitabschnitt einer Periode und mithin z. B. 90 Winkelgrade demjenigen $^1/_4$ Periode entsprechen. Auf den Schenkeln der Winkel werden die zur betreffenden Verschiebung gehörenden effektiven Phasen in geeignetem Längenmaass abgetragen. Da zwischen der effektiven Phase der Selbstinduktionsspannung und derjenigen von E_w eine zeitliche Verschiebung von $^1/_4$ Periode besteht, so wird sich diese Thatsache im neuen zeichnerischen Gewand so ausnehmen, wie es die Figur 51 erkennen lässt. Dort entspricht der Schenkel A B der Spannung $E_{eff\,w}$ und der Schenkel B C der Spannung $E_{eff\,s}$, während der Winkel, den diese beiden Schenkel einschliessen, 90° beträgt. Mit Hülfe geeigneter Experimente oder auch auf mathematischem Wege ist das hier sehr wichtige Faktum zu erlangen, dass die den Winkel zu einem rechtwinkligen Dreieck ergänzende Gerade A C in Grösse und Lage der effektiven Anschlussspannung gleichkommt. Der Winkel α gibt, da sich $E_{eff\,w}$ und S_{eff} zeitlich decken, das Maass für das oben angeführte Zeitlinienstück a, also das der Verschiebung zwischen Stromstärke und Anschlussspannung. An Hand der Figur 51 lassen sich über das Verhalten der in einem Selbstinduktionskreise auftretenden Hauptgrössen mehrere wichtige Schlüsse ziehen. So ist

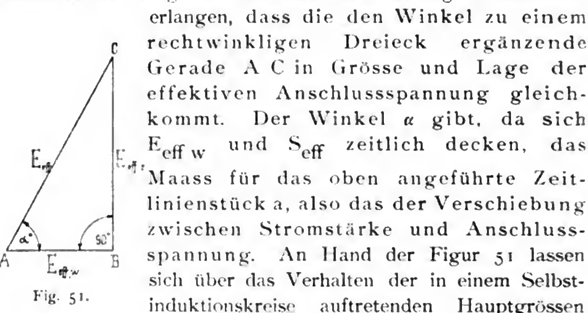


Fig. 51.

z. B. einleuchtend, dass sich eine Anschluss- bezw. Stromquellenspannung von bestimmter Grösse aus den verschiedensten Anteilen der Selbstinduktions- und Wattspannung kombiniren kann und zwar bewegen sich die möglichen Zusammensetzungen zwischen

den Extremen $E_{eff\,w} = o$, $E_{eff\,s} = E_{eff}$ und $E_{eff\,w} = E_{eff}$, $E_{eff\,s} = o$. Für die Ermöglichung einer bestimmten Kombination sind jene Grössen ausschlaggebend, welche die induzirten Spannungen dimensioniren, also z. B. $\sim$, $\mathfrak{B}_{max}$, q und Z. In den Spulenarrangements ist dabei der quantitative Vorgang bei Stromkreisschluss dergestalt, dass die Stromstärke so lange anwächst, bis die von ihr abhängigen $E_{eff\,s}$- und $E_{eff\,w}$-Beträge eine solche Grösse erlangt haben, dass sie in ihrer rechtwinkligen Kombination gerade die vorhandene Anschlussspannung ausmachen. Aus dem Spannungendreieck geht ferner hervor, dass relativ grosse Selbstinduktionsspannungen, mithin relativ kleine $E_{eff\,w}$-Werte grosse Verschiebungen zwischen Anschlussspannung und Stromstärke zur Folge haben und umgekehrt. Um zur mathematischen Formulirung der bedeutsamsten Grössenbeziehungen zu gelangen, ist der der Geometrie entlehnte, sogenannte Pythagoräische Lehrsatz in Anwendung zu bringen. Danach resultirt aus der Figur 51 die Gleichsetzung: $E^2_{eff\,w} = E^2_{eff} - E^2_{eff\,s}$. Wird beiderseits die Wurzel ausgezogen, so ist:

$$E_{eff\,w} = \sqrt{E^2_{eff} - E^2_{eff\,s}}.$$

Mit Hülfe dieser Formel lässt sich aus der effektiven Anschluss- und der Selbstinduktionsspannung das für die Grösse des zirkulirenden Stromes wichtige $E_{eff\,w}$ berechnen. Des Weitern besteht zwischen den Strecken A C und A B eine geometrische Beziehung, welche den Quotienten $\frac{A\,B}{A\,C}$, also auch $\frac{E_{eff\,w}}{E_{eff}}$ der Funktion Kosinus (cos) des Verschiebungswinkels α gleichsetzt. Diese Thatsache führt zu einer zweiten brauchbaren Beziehung, welche lautet:

$$E_{eff\,w} = \cos\alpha \times E_{eff}.$$

Der Vorteil dieser Gleichsetzung beruht darin, dass sich $E_{eff\,w}$ feststellen lässt, auch wenn die Selbstinduktionsspannung nicht zu ermitteln ist. Allerdings wird dabei vorausgesetzt, dass

an ihrer Stelle das Verschiebungsstück a in Rechnung gezogen werden kann. Zum besseren Verständniss des bisher Gebotenen mag an dieser Stelle ein Zahlenbeispiel eingeschoben werden.

Aufgabe: In einer mit unterteiltem Eisen ausgefüllten Drahtspirale, welche einen Widerstand von 0,73 Ω besitzt, soll ein Strom von 5,7 A zirkuliren. Die Anschlussspannung betrage 256 V. Welche elektrischen Eigenschaften sind zu erfüllen?

Lösung: Da die Stromstärke und der Widerstand gegeben sind, so lässt sich aus diesen Grössen mit Hülfe des Ohmschen Produktes $S_{eff} \times W$ die Spannung $E_{eff\,w}$ ermitteln. Es ist $E_{eff\,w} = 0{,}73 \times 5{,}7 = 4{,}16$ V. Wird die erste der obigen Gleichsetzungen derart umgeformt, dass $E_{eff\,s}$ auf die linke Seite zu stehen kommt und werden die Zahlenwerte für E_{eff} und $E_{eff\,s}$ eingesetzt, so ergibt sich die Selbstinduktionsspannung der Leiterspirale zu $\sqrt{256^2 - 4{,}16^2} = 255{,}965$ V. $E_{eff\,s}$ ist demnach beinahe eben so gross wie die Anschlussspannung selbst. Um die berechnete Selbstinduktionsspannung bei einer Stromstärke von 5,7 A hervorzubringen, müssen die noch ausser S_{eff} an der Induktion beteiligten Grössen so dimensionirt sein, dass sie in ihrer Gesammtheit eine Ziffer passender Grösse ausmachen. Die Aufsuchung dieser Ziffer sei für später vorbehalten. Wäre die Leiterspirale ohne die selbstinduzirende Fähigkeit, so müssten die 256 V in derselben eine Stromstärke von $\frac{256}{0{,}73}$ = rund 351 A erzeugen. Es wird demnach die Stromstärke durch die Selbstinduktion von 351 bis auf 5,7 A herabgedrückt. Aus der zweiten Gleichsetzung kann $\cos\alpha$ zu $\frac{4{,}16}{256} = 0{,}162$ und der Verschiebungswinkel α zu rund 81^0 festgestellt werden. Da 360^0 dem Zeitabschnitt einer Periode gleichwertig sind, so entsprechen die 81^0 einer zeitlichen Verschiebung zwischen Anschlussspannung und Stromstärke von $\frac{81}{360}$ oder rund 0,22 Perioden.

In dem Zahlenbeispiel ist die Auffassung vertreten, dass nur die Selbstinduktion und der Ohmsche Widerstand als spannungsverzehrende Ursachen in Betracht kommen. Nun lehrt aber die Erfahrung, dass hiezu auch noch die Hysteresis und die Wirbelstromerzeugung gezählt werden müssen. Durch Beides wird, im Falle $E_{eff\,s}$ und S_{eff} die berechneten Werte beibehalten sollen, die Anwendung einer grösseren Anschlussspannung bedingt. Die Ermittlung derselben und die Darlegung der einschlägigen Vorgänge kann erst später geboten werden.

Wird in der obigen Lösung die Anschlussspannung durch die Stromstärke dividirt, so erhält man die Zahl $\frac{256}{5{,}7}$ = rund 45. Was bedeutet dieselbe? Doch ohne Zweifel weiter nichts, als dass die stromschwächende Wirkung der Selbstinduktion quantitativ derart ausgeprägt ist, wie wenn die Spule nicht einen Widerstand von 0,73, sondern von 45 Ω besässe. Von dieser Auffassung sind die traditionellen Lehrbücher leider sehr weit entfernt. Sie lassen neben der bereits gekennzeichneten Wirkung der Selbstinduktion ruhig noch eine zweite herlaufen, welche sich in einer thatsächlichen — wenn auch als «scheinbar» angekündeten — Widerstandserhöhung dokumentirt. Hiemit sei eine und nicht die kleinste der im Eingang erwähnten Geschmackswidrigkeiten signalisirt. Etwas was keine Energie verzehrt und obenhinein Phasenverschiebungen hervorbringt, mit dem Ohmschen Widerstand in gleiche Linie zu stellen, ist eine Leistung, die bald noch über Geschmacksverletzung hinausgreift.

Zur Bewahrheitung der Dreiheitsregel alles Guten soll auch die dritte Art, wie sich die Elektrotechnik die Wirkungen der Selbstinduktion zurechtlegt, Aufnahme finden. Bei dieser wird die Phasenverschiebung zwischen Strom und Anschlussspannung nicht wie bisher dadurch erklärt, dass die letztere zwei Gegenkräfte zu überwinden hat, deren Wellen gegenseitig um $^1/_4$ Periode verschoben sind und wovon die eine sich in Phase zur Stromstärkenwelle befindet, sondern sie wird in der Weise entstanden gedacht, dass die Anschlussspannung zwei in ihren Stärkenwellen um $^1/_4$ Periode verschobene Ströme ins Leben ruft, von denen der eine mit seinen Phasen die gleichartigen der Spannungswelle



deckt. Die beiden Stromstärkenwellen müssen dabei so dimensionirt sein, dass sie bei ihrer Vereinigung eine Welle bilden, welche hinsichtlich ihrer Grösse und ihrer Lage mit derjenigen des thatsächlich fliessenden, gesammten Stromes übereinstimmt. Die Darstellungen der Figuren 50 und 51 können auch zur Verbildlichung dieser dritten Auffassungsweise herangezogen werden; nur bedeuten alsdann die mit E_s, E_w und E bezeichneten Wellen bezw. Dreiecksseiten diejenigen der Selbstinduktionsstromstärke S_s, der Energiestromstärke S_w und der Gesammtstromstärke S. Aber nicht nur die Figuren, sondern auch die beiden mathemathischen Beziehungen lassen sich sinngemäss für das Vorliegende in Verwendung nehmen. Der Vorteil, welcher mit der Zerlegung der Stromstärke zu gewinnen ist, tritt nur dann zu Tage, wenn die Phasenverschiebung zwischen Strom und Anschlussspannung eine solche Höhe erreicht, dass die S_s-Welle mit der Feldstärkenwelle in Phase kommt. Damit das Verschiebungsstück der Zeitlinie zu dem gewünschten Grössenbetrag gelangen kann, darf der durch den Ohmschen Widerstand bedingte Spannungsanteil E_w keinen Zahlenwert von Belang erreichen. Das mit der Feldstärke phasengleiche S_s, welches die Sonderbezeichnung Erregerstromstärke führt, ist gerade so gross, dass es das in dem gegebenen Induktionsstromkreis gewünschte $\mathfrak{B}_{max}$ hervorzubringen im Stande ist. Die zwischen der effektiven Erregerstromstärke und $\mathfrak{B}_{max}$ bestehende Grössenbeziehung ist bereits auf Seite 179 angeführt worden, sie ist: $\mathfrak{B}_{max} = \frac{1,78}{l} \times Z \times \mu_{\mathfrak{B}_{max}} \times S_{eff\,s}$. Die zu der Erregerstromstärke gehörende Energiestromstärke bringt den Einfluss der Hysteresis und der Wirbelströme in einem Stromkreis mit Selbstinduktion zum Ausdruck. Durch die Kombination der beiden Stromstärken kommt jene, bereits auf Seite 181 angedeutete Phasenverschiebung zwischen Strom- und Feldwelle zu Stande. Die Erregerstromstärke ist speziell für das Umformerschema von Wichtigkeit; ja man kann sagen, dass die dritte Auffassungsweise der Selbstinduktion lediglich dem Umformerproblem ihr Dasein verdankt. Da mit der Zerlegung der

Stromstärke S dem rechnenden Techniker wirkliche Vorteile erwachsen, so lässt sich ein derartiges Hülfsmittel immer noch rechtfertigen und mit der nötigen Reserve auch in Benützung ziehen, wennschon es, genau genommen, zu dem pikanten Widersinn eines Stromes führt, der trotz vorhandenem Widerstand zu seiner Aufrechterhaltung keiner Spannung bedarf.

Nach dieser kleinen Ablenkung vom eigentlichen Thema werde wieder auf die ursprüngliche und naturgemässe Ansicht von der Wirkung der Selbstinduktion zurückgegriffen und an der Hand derselben die Ausnützungsfähigkeit der mit Selbstinduktion behafteten Stromkreise hinsichtlich Lieferung elektrischer Energie einer Untersuchung unterzogen. Für die richtige Beurteilung dieser Eigenschaft können selbstverständlich nur jene Energiequantitäten Veranschlagung finden, welche, der Stromquelle entnommen, sich sofort in Nutzapparaten als Licht-, Wärme- oder sonstig geartete Erscheinungen bemerkbar machen. Um diese Mengen im Folgenden besonders zu kennzeichnen, mag die Energie die spezielle Bezeichnung «nützliche» führen. Den Ausgangspunkt der Betrachtungen bildet die Figur 50. In derselben sind die phasenverschobenen Wellen der Stromstärke und der Anschlussspannung, sowie die beiden Unterwellen der letzteren, zur Darstellung gebracht. Jedem Punkt der Zeitlinie entspricht eine E- und S-Phase von bestimmter Grösse, damit aber auch eine ihm charakteristische $E \times S$- oder Leistungsphase. Die innerhalb eines bestimmten Periodenabschnitts vorhandenen einzelnen Leistungsphasen ergeben in ihrer Gesammtheit ein Maass für die während dieser Zeit geleisteten elektrischen Arbeit, von der sich ein bestimmtes Quantum als Äquivalent der nützlichen Energie feststellen lässt. Die innerhalb einer Periode statthabenden Energievorgänge sind etwas verwickelter Natur, ergeben aber, als Ganzes aufgegriffen, ein leicht fassliches Endresultat. Werden zunächst die Vorgänge vom Anfang der Periode bis zu dem Zeitpunkt mit der Phase S_{max} ins Auge gefasst, so zeigt sich, dass die E-Phasen während dieses Zeitabschnittes zum Teil zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes als E_w-Phasen, zum Teil zur Überwindung der Selbst-

induktion als E_s-Phasen in Wirkung sind. Die E_w-Phasen bilden mit den zugehörenden S-Phasen nutzbare elektrische Arbeit, die $E_s \times$ S-Phasen hingegen nicht. Die dieser Arbeit entsprechende Energiemenge wandert in das elektromagnetische Wirbelfeld, um dort die durch die Selbstinduktion bedingten Wirkungen hervorzubringen. Es ist also während dieses Abschnittes eine Beeinträchtigung des Stromkreises zur Energieausnützung vorhanden. Dieselbe gewinnt dadurch noch besonders grosse Dimensionen, dass die E_s-Phasen nicht nur an sich für die Bildung nützlicher Energie unwirksam bleiben, sondern auch ihre strombildende Eigenschaft nicht zur Entfaltung bringen können. Die einzelnen Leistungsphasen würden wesentlich grösser ausfallen, wenn statt der E_w-Spannung die gesammte Anschlussspannung für die Stromstärken maassgebend wäre. Mit dem Fortschreiten auf der Zeitlinie, und zwar von dem Zeitpunkt mit der Phase S_{max} bis zum Beginn des Abschnittes a, wird ein Bereich betreten, in dem die Energievorgänge eine wesentlich abweichende Gestaltung besitzen. Die E-Phasen sind viel zu klein, um allein die vorhandenen S-Phasen hervorgebracht zu haben. Die Beträge, welche noch zu den erforderlichen E_w-Phasen fehlen, werden nicht von der Stromquelle, sondern von dem elektromagnetischen Wirbelfeld geliefert, welches die hineingewanderte Energie wieder zurückzugeben beginnt und zwar in solchem Umfang, dass ihre Leistungsphasen die von der Stromquelle produzirten E $\times$ S-Phasen gerade zu den in Summa auftretenden $E_w \times$ S-Phasen ergänzen. Da die $E_w \times$ S-Phasen insgesammt nützliche Arbeit bilden, so ist die Ausnützungsfähigkeit des Stromkreises innerhalb des zweiten Zeitabschnittes eine gute zu nennen. Bei jenem Abschnitt der Zeitlinie, welcher mit der Strecke a identisch ist, wirken die E-Phasen der Stromrichtung entgegen. Dieser Gegensatz zwischen Druck- und Fliessrichtung ist möglich, da die auch noch während der Zeit a andauernde Rückerstattung der Feldenergie Gegenspannungen erzeugt, welche grösser als die gleichzeitigen E-Spannungen sind. Die E-Phasen liefern nicht nur die zur

Strombildung notwendigen E_w-Beträge, sondern es verbleibt sogar noch ein Überschuss. Die denselben ausmachenden Phasenstücke ergeben im Verein mit den S-Phasen ein Arbeitsquantum, welches nicht dem Stromkreis zugutkommt, sondern der Stromquelle wieder anheimfällt. Die geleistete nützliche Arbeit wird durch die $E_w \times S$-Phasen gebildet. Die Fähigkeit, nutzbare Energie zu schaffen, ist während der Zeit a kleiner als im zweiten, aber grösser als im ersten der betrachteten Zeitabschnitte. — Hiemit sind die während einer halben Periode sich abspielenden Vorgänge erschöpft; da sich dieselben in den nächsten halben Perioden in gleicher Form wiederholen, so ist das Bisherige genügend, um die Gesammtwirkung der Selbstinduktion in Bezug auf die Energieausbeute darzulegen. Es ergibt sich zunächst die Thatsache, dass in Stromkreisen mit Selbstinduktion in Folge der zeitweiligen Inanspruchnahme eines Teiles der Anschlussspannung zur Überwindung gewisser, aus dem Feld entstammenden Gegenwirkungen und in Folge der direkten Rückgabe eines Teiles der produzirten Energie an die Stromquelle, eine Beeinträchtigung ihrer Energieausnützungsfähigkeit zu verzeichnen ist. Beide Verminderungsursachen geben sich an der Stromstärke kund, und zwar die erste durch deren Herabdrückung, und die zweite durch deren Phasenverschiebung gegen die Anschlussspannung.

In der Figur 52 II sind die von den E- und S-Phasen innerhalb einer Periode produzirten Leistungsphasen bildlich dargestellt. Sie bilden in ihrer Gesammtheit ein Quantum elektrischer Arbeit, und zwar stellen die oberhalb der Zeitlinie liegenden schraffirten Flächen den von der Stromquelle an den Induktionsstromkreis abgegebenen Arbeitsbetrag und die entgegengesetzt plazirten das vom Feld an die Stromquelle zurückerstattete Arbeitsquantum dar. Dieses letztere Quantum wird natürlich in der Stromquelle bei der Energielieferung wieder mit verwendet, so dass dieselbe um diesen Betrag weniger in Anspruch genommen ist. Daraus folgt das wichtige Ergebniss, dass die oberhalb der Zeitlinie gelegenen Flächen, nach Abzug der unterhalb liegenden, ein Maass für die innerhalb einer Periode entstehenden nützlichen

Energie verkörpern. In der Figur 52 sind unter I und III die beiden Grenzfälle des Selbstinduktionsproblems zeichnerisch mit aufgenommen, und zwar bedeutet Skizze I den Fall eines Stromkreises ohne Selbstinduktion, und Skizze II denjenigen eines Stromkreises mit soviel Selbstinduktion, dass die E_w-Phasen vollständig vernachlässigbar werden. Zufolge der Abwesenheit der Selbstinduktion gehen bei I Strom und Spannung in Phase und sind unterhalb liegende Arbeitsflächen nicht vorhanden. Die nützliche Energie, welche ein solcher Stromkreis produzirt, ist das Maximum, welches sich bei der Stromstärke S liefern lässt. Im Fall III sind Strom und Spannung um $^1/_4$ Periode verschoben und die unterhalb liegenden Arbeitsflächen ebenso gross wie die oberhalb liegenden. Es wird daher von diesem Stromkreis keine nützliche Energie — wenigstens keine messbare — geliefert. Er kann zwar sehr hohe Ströme führen und auch eine hohe Anschlussspannung besitzen, ein Wattmesser wird dessenungeachtet keinen Zeigerausschlag ergeben.

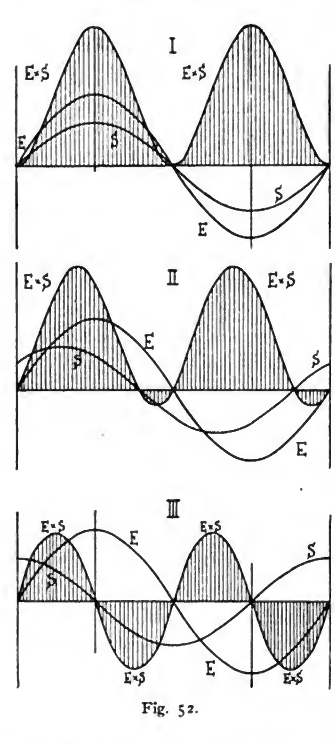


Fig. 52.

Aus den drei Darstellungen der Figur 52 resultirt, dass bei ein- und derselben Stromstärke und Spannung die Produktion der nützlichen Energie um so grösser ist, je kleiner das Verschiebungsstück a ausfällt und umgekehrt. Unter der Voraus-

setzung, dass die E- und S-Wellen Sinusform besitzen, lässt sich eine sehr einfache Gleichsetzung zwischen der nützlichen Energie E, S und a aufstellen. In der Zeichnung I sind die E_w-Phasen mit den E-Phasen identisch und die Leistungsphasen somit auch gleich $E_w \times S$; die $E_w \times S$-Phasen repräsentiren ausschliesslich nützliche Energie. In der Zeichnung III sind, da die E_w-Phasen so gut als auf Null reduzirt erscheinen, die zusammengehörenden E_s- und E-Phasen in ihrer Grösse übereinstimmend. Leistungsphasen treten zwar auf, aber es entspricht ihnen keine nützliche Energie. Aus diesen beiden Beispielen lässt sich der Schluss ziehen, dass für die Menge der nützlichen Energie lediglich die E_w-Phasen ausschlaggebend sind, und dass somit die nützliche elektrische Leistung durch das Produkt $E_{eff\,w} \times S_{eff}$ gebildet wird. Die Richtigkeit dieser Gleichstelluug ist auch durch Ausmessung der Arbeitsflächen der Fig. 52 II und durch passendes Vergleichen mit dem vorhandenen $E_{eff\,w}$ und S_{eff} erhärtbar. Im Zusammenhang mit der Figur 51, in welcher die zeitliche Wellenverschiebung durch Winkel verbildlicht ist, wurde die Beziehung $E_{eff\,w} = E_{eff} \times \cos\alpha$ aufgestellt. Diese Formel gibt das Mittel an die Hand, an Stelle von $E_{eff\,w}$ das viel wichtigere E_{eff} in das obige Produkt einzuführen. Die Gleichsetzung, welche dadurch erhalten wird, bildet einen mathematischen Zusammenhang, der für Wechselstromkreise und Sinuswellenphasen von fundamentaler Wichtigkeit ist. Er lautet:

$$\text{Nützliche elektrische Leistung} = S_{eff} \times E_{eff} \times \cos\alpha.$$

Dem $\cos\alpha$ hat man die gut gewählte Bezeichnung L e i s t u n g s f a k t o r beigelegt. Die Einführung dieser Benennung an Stelle des $\cos\alpha$ ist besonders dann am Platze, wenn Wellen beliebiger Form in Frage kommen, deren Verschiebung sich, in ihrem Einfluss auf die Leistung, nicht als Kosinus veranschlagen lässt. Da sich die nützliche Leistung in ihrer graduellen Verschiedenheit nur zwischen Null und $S_{eff} \times E_{eff}$ bewegen kann,

so erhellt daraus für den Leistungsfaktor die Einhaltung des engen Zahlenbereiches von der Null bis zur Eins. Dieser Bereich wird auch in der Fundamentalformel nicht überschritten, denn es kommen nur Phasenwinkel bis zu 90° in Frage und für diese schwankt die Kosinusfunktion zwischen Eins und Null.

Das Zahlenbeispiel der Seite 196 kann durch das Neugewonnene um einige lehrreiche Ziffern erweitert werden. Die nützliche Leistung, welche in der im Beispiel zitirten Drahtspirale frei werden muss, beträgt $256 \times 5{,}7 \times 0{,}162 =$ rund 24 Watts. Dieser Betrag wird durch den Einfluss der Hysteresis und der Wirbelströme noch wesentlich erhöht. Die Ermittlung dieses Zusatzes ist für später vorbehalten. Würde in der Drahtspirale die Selbstinduktion durch ein geeignetes Mittel beseitigt werden, und würde die Stromstärke in unveränderter Stärke aufrecht erhalten werden, so müsste die Spule eine nützliche Energie von $256 \times 5{,}7 =$ rund 1460 Watts, also sechsmal mehr als vorher produziren. Wenn jedoch die Anschlussspannung mit allen 256 Watts in dem Spiralenwiderstand 0,73 Ω Stromstärke bilden könnte, so würde diese die Höhe von $\frac{256}{0{,}73} = 350$ A erreichen und die nützliche Leistung wäre auf $350 \times 256 = 90\,000$ Watts oder das 3750-fache der ersten gestiegen. Wennschon sich derartige Ziffern, wie die letzte, nicht gut praktisch bewahrheiten lassen — denn die Drahtspirale würde dabei zu Dampf werden — so haben sie doch theoretischen Wert, da sie recht drastisch die Herabdrückung der Ausnützungsfähigkeit von Stromkreisen mit Selbstinduktion illustriren.

Vom Standpunkt des Maschinenbauers aus beleuchtet, liegt in der Erniedrigung des Quantums nützlicher Energie durch Einfügen von Selbstinduktion eine Folgerung, welche nicht erfreulich ist. Zur Charakterisirung derselben diene das Beispiel eines Umformers, welcher auf seiner Sekundärseite einmal Glühlampen und das andere Mal einen Elektromotor mit Strom versorgt. Der Umformer besitze eine solche Grösse, dass er die für die Glühlampen erforderliche Wattleistung gerade zu liefern in der Lage ist. Der Motor benötige dieselben Watts wie die Glühlampen. Glühlampen besitzen keine Selbstinduktion; der Motor ist jedoch mit solcher behaftet, und zwar mag ihr Einfluss

quantitativ so ausgeprägt sein, dass ein Leistungsfaktor 0,8 in Anschlag zu bringen ist. Die sekundäre Anschlussspannung sei für den Betrieb beider Arten Nutzapparate gleichgross. Um bei der gleichen Spannung dieselbe Wattzahl wie die Glühlampen aufzunehmen, bedarf der Elektromotor zur Ausgleichung des Leistungsfaktors eine $\frac{1}{0,8}$ mal so grosse Stromstärke wie zuvor. Diesen Mehrstrom kann aber der Umformer nicht liefern, wenn er nicht in Betriebsverhältnisse gelangen will, die unzulässig sind. Es verbleibt kein anderes Mittel, wie den Umformer um so viel zu vergrössern, dass seine Leistungsfähigkeit auf das 1,2-fache — also auf ein Mehr von 20 % — anwächst. Dasselbe gilt auch für die Dimensionirung der Zuleitungen und endlich des Elektromotors selbst, wenn dieser mit einem Gleichstrommotor verglichen wird. Ohne also mehr nützliche Watts zu liefern, beziehungsweise zu verbrauchen, bedürfen Einrichtungen, bei denen die Selbstinduktion in erheblichem Umfang zur Geltung gelangt, einer Vergrösserung ihrer Abmessungen und damit auch einer solchen der Anlagekosten. Wird das Beispiel denjenigen Betriebsverhältnissen angepasst, welche auf Konstanthaltung der primären Anschlussspannung hinarbeiten, so gestaltet sich die Ausnützungsfähigkeit noch ungünstiger. Wie später noch nachgewiesen werden wird, nimmt die sekundäre Anschlussspannung beim Anschluss des Motors einen kleineren Betrag an, als bei dem der Glühlampen. Diese Herabminderung der Spannung muss durch eine entsprechende Vergrösserung der Stromstärke ihren Ausgleich finden können, wenn die oben geforderte Wattleistung im Motor in Aktion treten soll. Also auch diese Wirkung der Selbstinduktion läuft, wie gesagt, auf eine unvorteilhafte Inanspruchnahme der maschinellen Einrichtungen hinaus.

Da gerade bei Wechselstromproblemen sehr viel Gebrauch von bildlichen Darstellungen und namentlich von dem entsprechend ausgebauten Dreiecksschema der Figur 51 gemacht wird, so sei zur raschen Orientirung über das Quantum der nützlichen Energie eine einfache Gedächtnissregel eingeschaltet. Sie lautet: Spannungs- und Stromwellen, welche in Phase gehen, oder effektive Spannungs- und Stromphasen, welche in der Winkeldarstellung zusammenfallen, liefern nützliche Energie im vollen Betrag von S × E.



Spannungs- und Stromwellen, welche um ein Viertel der Periode gegenseitig verschoben sind, oder effektive Spannungs- und Stromphasen, welche einen Winkel von 90° einschliessen, liefern keine nützliche Energie, und endlich, Spannungs- und Stromwellen, deren gegenseitige Verschiebung innerhalb $^1/_4$ Periode liegt, oder effektive Spannungs- und Stromphasen, welche einen Winkel zwischen 0° und 90° einschliessen, liefern ein Quantum nützlicher Energie, welches sich um so mehr dem durch $S \times E$ ausgedrückten nähert, je kleiner das Verschiebungsstück a oder der Winkel α dimensionirt ist.

Da die bisherigen Entwicklungen die Thatsache zu Tage förderten, dass beim Zunehmen der Stromstärkephasen Energie in das elektromagnetische Feld wandert, welche beim Abnehmen derselben in vollem Betrage wieder abgegeben wird, so lässt sich hieraus, und unter der Voraussetzung, dass die Beschaffenheit des Feldes in Wirklichkeit den Vorstellungen des Abschnitts III entspricht, ein Fingerzeig über die Ursache der Selbstinduktion entnehmen. Die Ätherwirbel und die Eisenmoleküle vollführen Drehungen und Schwingungen um eine Gleichgewichtslage und in einem Rythmus, der durch die Periodenzahl bestimmt wird. Während des Anwachsens der Stromstärke nimmt die Dreh- und Schwingungsgeschwindigkeit ständig zu, während der Abnahmeperiode jedoch ständig ab. Der Änderungsgrad der Geschwindigkeit der Feldmaterie hängt von dem der Stromstärke ab und lässt sich am Steilheitsgrad der Phasenwelle abschätzen. Ein derartiges mechanisches Spiel muss aber unausgesetzt die Wirkungen des Trägheitsgesetzes in Anspruch nehmen und diese bestehen eben in einer Energieaufnahme seitens der Feldmaterie bei ihrer Geschwindigkeitserhöhung und in der Zurückgabe derselben bei der Verminderung der Geschwindigkeit. Diese mechanische Deutung des Wesens der Selbstinduktion hat zwar sehr viel Wahrscheinlichkeit für sich, sie ist aber experimentell noch zu wenig erhärtet, um über den Charakter einer sachgemässen Hypothese hinauszugreifen. Die Rückwirkungen der mit Trägheit behafteten, schwingenden Eisenmoleküle und der Ätherwirbel bestehen in der Induktion der E_s-Spannung, und zwar muss, in Anlehnung an das Gesagte, die Phasengrösse von

dem Änderungscharakter der zugehörenden Stromphase abhängen, wodurch bei Sinuswellen die bekannte, in der Figur 48 skizzirte Phasenverschiebung bedingt wird.

Nachdem das Wesen und die Wirkungen der Selbstinduktion genügend klargelegt sind, um deren Einfluss auf den Übertragungsvorgang im Umformer richtig veranschlagen zu können, ist es zunächst angebracht, zwei weitere, quantitativ nicht vernachlässigbare Nebenerscheinungen zur genügenden Darstellung zu bringen. Es sind dies, wie bereits schon erwähnt, die Hysteresis und die Wirbelstrombildung. Was unter der ersteren Erscheinung zu verstehen ist, wurde bereits im dritten Abschnitt auf Seite 91 auseinandergesetzt; es erfordert daher nur der Begriff der Wirbelstrombildung eine Erläuterung. Bekanntlich werden in geschlossenen Stromkreisen, welche von einem Wechselfeld durchsetzt werden, Induktionsströme hervorgerufen. Als geschlossene Stromkreise sind bisher lediglich einzelne Drahtwindungen oder Drahtspiralen in den Kreis der Betrachtungen gezogen worden. Als solche müssen aber doch auch der das Wechselfeld führende Eisenkern und die von den Kraftlinien der Nebenfelder durchsetzten Metallmassen der Spulen angesehen werden. Da derartige Stromkreise in ihrer ganzen Fläche Ströme führen können, so bilden sich in ihnen förmliche Wirbel von elektrischen Strömen, welche Eigenthümlichkeit zur Namenbildung dieser speziellen Art von Induktionswirkung diente. Sowohl die Hysteresis als auch die Wirbelstrombildung sind Vorgänge, welche, wie vorweggenommen sein mag, im Umformer nützliche Energie beanspruchen. Da dieselbe vollständig in die Form von Wärme übergeführt wird, so erhellt als Folge der beiden namhaft gemachten Nebenerscheinungen eine Beeinträchtigung des Wirkungsgrades. Die Selbstinduktion ist in dieser Hinsicht grundverschieden an Effekt; sie beeinträchtigt lediglich die Ausnützungsfähigkeit, nicht aber den Wirkungsgrad des Umformers. Die quantitative Ausgestaltung der Hysteresis und der Wirbelströme wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, worunter sich auch die maximale Feldstärke befindet. Im belasteten Umformer sind beide Leiterspiralen felderregend und induzirend thätig, dessenungeachtet kommt für die Grösse des Energieverlustes nur ein Teil der primären Wirkungen in Betracht und zwar derjenige, welcher z. B. im sekundär offenen,

also dort stromlosen Umformer vorhanden ist. Die Schlussbetrachtungen über den Umformer werden die Richtigkeit dieses charakteristischen Verhaltens noch klar erkennen lassen. Für das Vorliegende erhellt daraus die grosse Annehmlichkeit, dass das einfache Schema einer einzelnen, eisenerfüllten Drahtspirale, welche von Wechselströmen durchflossen wird, in Anwendung kommen kann.

Wird zunächst die Hysteresis ins Auge gefasst, so sind zwei für dieselbe sehr charakteristische Wirkungen anzuführen. Die erste ist die bereits auf Seite 180 kennengelernte Verschiebung und Verzerrung der Stromstärkenwelle gegen die Feldstärkenwelle, und die zweite besteht in der Inanspruchnahme einer Spannungswelle, welche mit der E_w-Welle vollständig in Phase geht. Die Art der Verzerrung wurde ebenfalls auf Seite 180 kurz beschrieben und eine zeichnerische Wiedergabe der Strom-

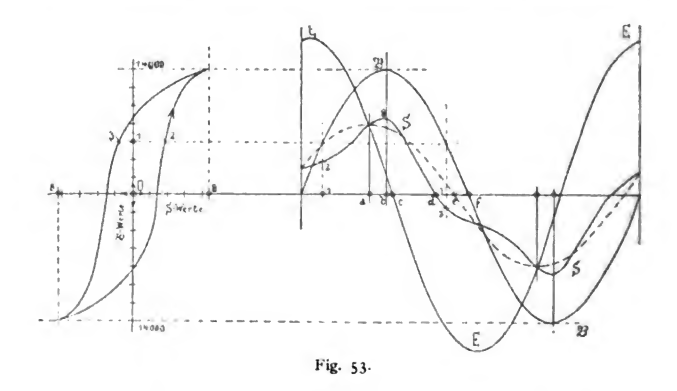


Fig. 53.

kurven aus der Hysteresisschleife in Aussicht gestellt. Diese Konstruktion ist in der Figur 53 zur Durchführung gebracht. Zu ihrem Verständniss ist im Nachstehenden eine knappe Erläuterung aufgeführt. Zur Linken der Figur 53 ist die Hysteresisschleife abgebildet, und zwar für eine maximale Feldstärke von 14000 Dynen. Um mit ihr ins Klare zu kommen, sind die

Erklärungen der Seite 87 und flg. nachzulesen und sinngemäss zu erweitern. Im Unterschied zu dort, sind hier auf dem Horizontalschenkel nicht $\mathfrak{H}$-Werte, sondern die proportionalen S-Werte aufgetragen. so dass z. B. die Figur 53 direkt erkennen lässt, dass $\mathfrak{B}$ = 14000 eine feldbildende Stromstärke von 8 A entspricht. Zur Rechten der Figur 53 ist eine der Figur 50 analoge, jedoch dem Einfluss der Hysteresis angepasste Wellendarstellung aufskizzirt. Die Phasen der Sinusfeldwelle sind in demselben Maassstab wie die $\mathfrak{B}$-Beträge der Schleife eingetragen und ausserdem beträgt die Maximalphase ebenfalls 14000 Dynen. Da die Schleife die zu den verschiedenen $\mathfrak{B}$-Werten gehörenden S-Werte ohne weiteres am Maasskreuz abzugreifen gestattet, so bildet sie ein sehr einfaches Hülfsmittel zur Entwerfung der verzerrten und verschobenen Stromwelle. Die Übertragungsmethode der S-Werte von der Schleife in das Wellenschema, kann für die Phasen 1,2 und 1,3 an der Hand der Figur 53 eingehend verfolgt werden. Sie ist für alle übrigen Phasen ebenso geartet. Werden die freien Enden der Phasen durch eine stetige Linie miteinander verbunden, so bildet dieselbe den Kurvenzug der durch die Hysteresis und die Durchlässigkeit verzerrten Stromwelle. Werden die Wellen der Figur 53 mit denen der Figur 50 verglichen, so springt die nur durch die Hysteresis bewirkbare Phasenverschiebung zwischen der Feldwelle und der Stromwelle besonders krass ins Auge. Die Grösse der Verschiebung wird durch die Strecke d f verkörpert. Da die Verschiebung nach der E-Welle zu erfolgt, so wird schon dadurch eine Leistung nützlicher Energie gefordert, die durch die induzirte Hysteresisspannung eine quantitative Steigerung erfährt. Wollte man den der Strecke d c äquivalenten Leistungsfaktor zur Berechnung der nützlichen Energie heranziehen, so würde sich ein zu grosser Betrag ergeben. Die Ursache ist darin zu suchen, dass eine Feldbildung bis zu 14000 Dynen schon in das Bereich der Sättigung hineingreift, innerhalb welchem das Verhältniss zwischen der effektiven und der maximalen Phase nicht mehr mit dem einer Sinuswelle übereinstimmt. Da es jedoch bei einem Umformer nichts verschlägt, wenn der Teil der verzerrten Stromstärkenwelle, welcher die Nichtübereinstimmung verursacht, vernachlässigt wird, so lässt sich auch für die hohe Feldstärke von

14000 Dynen die Annahme der Seite 181 aufgreifen, dass in der Leiterspirale Sinuswellenströme zirkuliren. Die für die Energieproduktion vollständig gleichwertige Sinusstromwelle wird in der Figur 53 durch die gestrichelte Kurve angedeutet. Ihre Phasenverschiebung zu der 𝔅-Welle (e f oder a b) ist kleiner, hingegen die zu der E-Welle (c e) grösser als diejenige der verzerrten Welle. Für die Zwecke der Rechnung ist lediglich das Verschiebungsstück e f massgebend. Steinmetz hat an Hand seines auf Seite 92 angeführten Erfahrungsgesetzes für den Sinus dieses im Winkelmaass ausgedrückten Stückes eine mathematische Beziehung aufgestellt, welche lautet: $\sin e f = \frac{4 \times \text{Materialfaktor} \times \mu_{\mathfrak{B}_{max}}}{\mathfrak{B}^{0,4}_{max}}$.

Indem in der Figur 50 die 𝔅-Welle um das Stück e f nach rechts verschoben gedacht wird, ist auch dieses Schema mehr dem Einfluss der Hysteresis angepasst. Zur Erzielung einer vollständigen Übereinstimmung ist noch die zweite Wirkung der Hysteresis, der Spannungsaufwand, in Betracht zu ziehen. Die hiezu in entsprechendem Maass in Anspruch genommene Anschlussspannung hat keinen einer induzirten Gegenspannung ähnlichen Widerstand zu überwinden, sondern eher einen solchen, welcher mit dem Leiterwiderstand Übereinstimmendes aufzuweisen hat. Vielleicht gelingt einmal der Nachweis, dass etwas wie ein Reibungsvorgang zwischen den Molekülen diesen Widerstand verursacht. Was aber auch die Veranlassung desselben sein mag, eine Thatsache über ihn ist sicher festgestellt und zwar die, dass die zu seiner Überwindung in den verschiedenen Zeitpunkten erforderlichen Spannungsbeträge zu einander in demselben Grössenverhältniss wie die entsprechenden Stromstärkenphasen stehen. Die Gesammtheit der der Hysteresis zugewandten Spannungsanteile muss demnach eine Sinuswelle ausmachen, welche mit der äquivalenten Sinusstromwelle in Phase geht. Hiemit ist aber auch die Begründung für das bereits Vorweggenommene gegeben, nämlich, dass die Hysteresis einen Vorgang verkörpert, welcher in jedem Zeitpunkt nützliche Energie beansprucht. Zur Unterscheidung der ebenfalls mit dem Strom in Phase gehenden E_w-Welle, mögen die Hysteresis-Spannungen

die abgekürzte Bezeichnung E_h führen. Wird die Figur 50 um diese neue Welle vermehrt gedacht, so leuchtet ein, dass eine Kombination der E_s-, E_w- und E_h-Wellen zu der Welle der Anschlussspannung, diese, gegenüber früher, nicht nur mit einem grösseren effektiven Betrag, sondern auch mit einer Annäherung an die Stromwelle, also einer noch erheblicheren Verkleinerung der Phasenverschiebung auszeichnet. In der Figur 53 ist diese E-Welle dargestellt; das Verschiebungsstück zwischen ihr und der Stromstärkenwelle entspricht der Strecke c e und die nützliche elektrische Leistung beträgt $E_{eff} \times S_{eff} \times \cos c\,e$. Da die Selbstinduktionsspannung an der Bildung nützlicher Energie keinen Anteil nimmt, so muss sich die elektrische Leistung auch durch die Summe $E_{eff\,w} \times S_{eff} + E_{eff\,h} \times S_{eff}$ ersetzen lassen. Zur Feststellung des zur Bewältigung der Hysteresis erforderlichen Leistungsanteiles ist die auf Seite 92 aufgestellte Gleichsetzung vorzüglich geeignet. Mit der ziffernmässigen Ermittlung der Hysteresis-Watts geht die der effektiven Hysteresisspannung Hand in Hand. Diese Spannung ergibt sich aus dem Quotienten $\frac{\text{Hysteresisleistung}}{S_{eff}}$. Aus der Steinmetzschen Hysteresisformel lässt sich eine für das Umformerschema wichtige Erkenntniss feststellen. Sie zeigt nämlich, dass sich in einem eisengeschlossenen Wechselstromkreis, welcher von Strömen mit gleichbleibender Periodenzahl durchflossen wird, der Wattverlust durch Hysteresis — und übrigens auch der durch die Wirbelströme im Eisen — so lange unverändert erhält, wie das induzirende Feld Konstanz bewahrt.

Nachdem das Wesentliche und Notwendige über den Hysteresisvorgang zur Darstellung gelangte, soll auch die Wirbelstrombildung einer Untersuchung unterzogen und die brauchbaren Schlussfolgerungen abgesondert werden. Es wurde bereits angedeutet, dass die Wirbelstrombildung eine Erscheinung rein elektrischer Art darstellt, welche ihren Sitz in den Eisen- und Kupfermassen hat. Die Ströme in den Kupfermassen werden von den Nebenfeldern hervorgerufen. Da sie der Berechnung nur schwer zugänglich sind und übrigens meistens einen ver-

schwindend kleinen Einfluss rückäussern, so werden sie in der Regel vernachlässigt — was auch hier geschehen mag. Das ganze Interesse ist auf die Wirbelströme im Eisen zu konzentriren. Um sich über ihr Zustandekommen und ihre Gestaltung ein klares Bild machen zu können, werde angenommen, dass die Wechselstromspirale einen Hohlraum von kreisrundem Querschnitt besitze, welcher von dem Eisenkern dicht ausgefüllt wird. Im Innern des Kerns lagern die von dem Spulenstrom erzeugten Wirbel und zwar, gemäss Figur 20 bezw. 30, so, dass ihre Kraftlinien parallel zur Spulenachse eingerichtet sind. Denkt man sich zwei in passender gegenseitiger Entfernung gehaltene Schnitte senkrecht zur Achse durch den Kern vollzogen, so wird dadurch eine Eisenscheibe isolirt, welche die Kraftlinien senkrecht durchsetzen. Diese Scheibe kann als ein Gebilde angesehen werden, welches sich aus einer Anzahl konzentrisch ineinanderliegender Ringe zusammenbaute. Mit Hülfe des Ringschemas lassen sich leicht klare Vorstellungen über die Wirbelstrombildung gewinnen. Der äusserste Ring besitzt den grössten Durchmesser und schneidet mit seiner Fläche sämmtliche Kraftlinien durch; der nächste Ring hat einen etwas kleineren Durchmesser und seine Fläche umfasst dementsprechend weniger Kraftlinien; beim dritten Ring wird die Verkleinerung des Durchmessers und der Kraftlinienzahl fortgesetzt, ebenso aber auch bei sämmtlichen andern, welche dem Scheibenzentrum immer näher zuliegen. Jeder Ring stellt mit seinem Wechselfeldanteil einen Aufbau dar, welcher mit demjenigen der Figur 46 vollinhaltlich übereinstimmt. In jedem Ring wird demnach eine Spannung induzirt, deren Grösse der Querschnittsfeldstärke proportional ist, und die einen entsprechend starken Strom im Ringe kreisen lässt. Es entpuppt sich somit die Erscheinung der Wirbelstrombildung zu einer Wirkung der Wechselstrominduktion. Die Eisenscheibe ist die Bahn eines um ihr Zentrum rotirenden induzirten Stromwirbels, dessen Stärke von aussen nach innen stetig abnimmt und im Zentrum selbst den Wert Null besitzt. Da der ganze Eisenkern sich durch Scheiben geometrisch entwickeln lässt, so muss die Kenntniss der Gestaltung der Wirbelströme in einer derselben, auch zu der des Kernes hinleiten. Es ergibt sich somit für den Kern das Faktum, dass sein Inneres von einer Stromwirbelsäule ausgefüllt

wird, deren Drehachse mit der Kern- bezw. Spulenachse identisch ist. Insofern die Wirbelströme den Ohmschen Widerstand der Eisenmasse zu überwinden haben, leisten sie elektrische Arbeit und setzen dieselbe in Wärme um. Das der Arbeitsleistung entsprechende Energiequantum kann nur dem Spulenstromkreis entstammen; es müssen deshalb die Wirbelströme eine Rückwirkung auf diesen äussern. Diese Rückwirkung besteht aber nach dem zweiten Analogon des Lenzschen Gesetzes darin, dass das Gegenfeld der Wirbelsäule eine Gegenspannung in der Spule hervorruft, welche die Anschlussspannung überwinden muss. Bei einem massiven Eisenkern ist der der Wirbelstrombildung zufallende Spannungsanteil und auch der Energieverlust recht gross. Die Verwendung massiver Eisenmassen bei Wechselstromkreisen ist deshalb durchaus nicht empfehlenswert. Übrigens spricht noch ein zweiter Umstand sehr gegen die Benützung derartiger Eisenkerne. Das Gegenfeld der Wirbelsäule setzt sich aus den Feldern der einzelnen, ineinanderliegend gedachten Eisenringe zusammen. Demgemäss wird sich die Anzahl der vereinigten Einzelfelder nach dem Zentrum des Kernquerschnittes zu in steter Steigerung befinden und dadurch erfährt die Feldstärke des Gegenfeldes eine Gestaltung, die sich durch kontinuirliche Zunahme von aussen nach innen auszeichnet. Bei der Vereinigung des Gegenfeldes mit dem Spulenfeld zeigen sich ziemlich verwickelte Erscheinungen, deren detaillirte Kennenlernung für das Vorliegende belanglos ist. Von Interesse ist nur das, dass sich die beiden Felder in den Kernschichten, welche der Achse benachbart liegen, gegenseitig so gut wie aufheben. Die Fähigkeit der stromdurchflossenen Leiterspirale, in einer Sekundärspule induzirend zu wirken, wird demnach herabgedrückt und zwar, wie die Erfahrung lehrt, in quantitativ recht erheblichem Maasse. Als Ersatz für die in Wechselstromapparaten unbrauchbaren massiven Eisenkerne kommen in der Elektrotechnik ausschliesslich solche in Verwendung, welche aus dünnen Drähten oder Blechen zusammengesetzt sind. Diese Einzelbestandteile werden dabei so gelagert, dass ihre Längsflächen parallel zu den Kraftlinien liegen und werden mittelst eines Ölfarbenanstrichs oder Papierzwischenlagen vor metallischer Berührung geschützt. Durch dieses Unterteilen des Eisenkernes wird die Wirbelstrombildung zwar nicht

vermieden, aber immerhin quantitativ wesentlich reduzirt. Die den ganzen Kern ausfüllende Wirbelsäule zerfällt nämlich in eine grosse Anzahl Wirbelfäden, deren Durchmesser nicht grösser als die Draht- bezw. Blechdicke sein können. Der einzelne Wirbelfaden besitzt ein Feld von recht geringer mittlerer Stärke. Die gesammte Querschnittsfeldstärke findet ihren Ausdruck durch die Vervielfachung dieser Feldstärke mit dem Kernquerschnitt. Es leuchtet ein, dass dieser Betrag lange nicht mehr so bedeutend sein kann, wie der eines massiven Kernes. Trotzdem also die Wirbelfäden in ihrer Gesammtheit die Wirbelsäule ausmachen, ist ihre gesammte schädliche Wirkung doch so zusammengeschmolzen, dass davon der Wirkungsgrad nicht mehr nennenswert ungünstig beeinflusst wird. Die von dem reduzirten totalen Gegenfeld induzirte Spulenspannung enthält einen Selbstinduktionsanteil, welcher aber bei gut unterteiltem Eisen vernachlässigt werden kann, so dass zwischen der Spulenstromstärke und dem die Wirbelstromspannung überwindenden Betrag der Anschlussspannung gemäss Seite 173 Phasenzusammenfall anzunehmen ist. Einer Sinusstromstärkewelle muss aber alsdann auch eine Sinuswelle der Wirbelstromspannung entsprechen und die durch die Wirbelstrombildung verbrauchte nützliche Energie wird ihren äquivalenten Ausdruck durch das Produkt aus effektiver Spulenstromstärke und effektiver Wirbelstromspannung finden. Die Wirbelstromspannung mag, zur Unterscheidung von den übrigen zwei wattbildenden Spannungsarten E_w und E_h, die Buchstabenbezeichnung E_f erhalten. Wie bei der Hysteresiserscheinung, ist es auch bei der Wirbelstrombildung sehr wünschenswert, eine mathematische Beziehung zwischen der in Wärme umgewandelten elektrischen Leistung und ihren Bestimmungsgrössen zu besitzen. Eine derartige Beziehung lässt sich mit Zuhilfenahme der auf Seite 179 angeführten Gleichsetzung gewinnen. Das einzuschlagende Verfahren scheint einfacher Natur zu sein. Es ist lediglich der Energieverbrauch eines Stromwirbels festzustellen und dieser mit der Anzahl der Wirbelfäden zu vervielfachen, um die gesammte nützliche Leistung zu erhalten. Die Grössen, aus denen sich die Energieformel zusammenbaut, und wozu die Kernlänge und der Kernquerschnitt gehören, lassen sich in zwei

Gruppen scheiden. Die eine umfasst den Energieverbrauch pro Einheit des Kernvolumens und die andere das Kernvolumen selbst. Es ist üblich, die Gleichsetzung in dieser Anordnung aufzustellen und zu verwenden. Unter der Voraussetzung, dass der Kern aus Blechen zusammengesetzt ist, deren Dicke im Zentimetermaass zum Ausdruck kommt, und deren elektrische Leitungsfähigkeit der Zahl 10 (siehe die Tabelle auf Seite 31) entspricht, erhält die Formel zur Berechnung der Wirbelstromwatts die Gestalt:

$$\text{Wattverlust} = 1{,}645 \times \text{Blechdicke}^2 \times \sim^2 \times \mathfrak{B}_{max}^2 \times \text{Volumen} \times 10^{-11}.$$

Zu dieser Gleichsetzung, welche das Pendant der Steinmetzschen Hysteresisformel bildet, ist noch erläuternd zu bemerken, dass das Kernvolumen mit Kubikzentimeter zu messen ist. Aus dem Wattverlust lässt sich mit Hülfe des Quotienten $\frac{\text{Wattverlust}}{S_{eff}}$ die effektive Wirbelstromspannung berechnen.

Zum Schlusse der Betrachtungen über die in Wechselstromkreisen sehr zu beachtenden Nebenerscheinungen der Selbstinduktion, Hysteresis und der Wirbelströme, sollen die für den Umformer bedeutsamen Wirkungen derselben kurz zusammengefasst werden.

Die Anschlussspannung E_{eff} setzt sich aus den vier Anteilen $E_{eff\,s}$, $E_{eff\,h}$, $E_{eff\,f}$, und $E_{eff\,w}$ zusammen. $E_{eff\,s}$ ist gegen die Spulenstromstärke S_{eff} um $^1/_4$ Periode verschoben und verursacht demnach keinerlei Aufwand an nützlicher Energie. Sie drückt die Fähigkeit des Stromkreises, Energie zu übertragen, wesentlich herab. — Die Hysteresis verursacht eine Verzerrung und Verschiebung der Stromwelle gegen die Feldwelle. $E_{eff\,h}$ und das S_{eff} der äquivalenten Sinusstromstärkenwelle fallen zeitlich zusammen, wodurch sich die Hysteresis als eine Erscheinung, welche nützliche Energie verbraucht, kennzeichnet. Da $E_{eff\,s}$ nicht zu der Feldwelle, sondern zu S_{eff} um $^1/_4$ Periode verschoben ist, so muss das Feld nicht, wie die Fig. 50 voraussetzt, die Gegenspannung von E_s, sondern eine solche induziren,



welche sich aus E_s und E_h, als Dreiecksseite A C (siehe Fig. 51) ergibt. Hiedurch ist übrigens auch ein zweites Maass für die Grösse der Verschiebung zwischen $\mathfrak{B}_{eff}$ und E_{eff} festgelegt. Die Verschiebung muss gerade so bemessen sein, dass die Resultante aus $E_{eff\,s}$ und $E_{eff\,h}$ um 1/4 Periode gegen $\mathfrak{B}_{eff}$ versetzt erscheint.

Die Verschiebung zwischen der Sinusfeldwelle und der äquivalenten Sinusstromwelle wird zur Veranlassung, dass die beiden maximalen Phasen zeitlich nicht mehr zusammenfallen. An die Stelle von S_{max} tritt eine andere Phase der Stromwelle, deren relative Grösse von dem Verschiebungsgrad abhängt. Diese Phase mag zur Andeutung, dass durch sie $\mathfrak{B}_{max}$ hervorgebracht wird, die Buchstabenbezeichnung $S_{\mathfrak{B}_{max}}$ führen. Da die quantitative Bemessung der wichtigsten Grössen eines Wechselstromkreises von der maximalen Feldstärkenphase mit abhängig ist, und $\mathfrak{B}_{max}$ ihr Dasein $S_{\mathfrak{B}_{max}}$ verdankt, so leuchtet ein, dass diese Stromphase einen bald ebenso bedeutsamen Charakter wie die effektive Stromphase besitzt. Die $S_{\mathfrak{B}_{max}}$-Phase muss naturgemäss stets kleiner sein als die S_{max}-Phase sein; dadurch werden aber die übrigen, ausser $S_{\mathfrak{B}_{max}}$ an der Feldbildung beteiligten Einflüsse in intensiverem Maasse herangezogen, als wenn keine Hysteresis und folglich auch keine Feldverschiebung vorhanden wäre. Die $S_{\mathfrak{B}_{max}}$-Phase lässt sich aus der meistens bekannten S_{max}-Phase leicht berechnen, da ja beide Phasen ein und derselben Sinuswelle angehören und in diesem Fall die kleinere Phase sich bekanntlich durch Vervielfachung der grösseren mit dem Kosinus des Verschiebungswinkels ergibt. Für die Grösse des Verschiebungswinkels ist die Steinmetzsche Winkelformel maassgebend. Die Notwendigkeit, sich bei allen einschlägigen Untersuchungen der Stromphase der maximalen Feldstärke bedienen zu müssen, wurde die direkte Veranlassung zur Aufgreifung des bereits angedeuteten Hülfsmittels, den fliessenden Strom in einen wattlosen und einen wattbildenden Bestandteil zu zerlegen. Durch

Vergleichung lässt sich leicht herausfinden, dass $S_{\mathfrak{B}max}$ und die wattlose Komponente S_s Einerlei bedeuten. Die Feststellung von $S_{\mathfrak{B}max}$ bildet den einzigen Fall, bei welchem das Schema der Stromstärkenzerlegung allenfalls einen wirklichen Nutzen stiften kann; aber selbst hier lässt es sich sehr wohl durch den obigen einfachen Gedankengang ersetzen. Der übrigens auch an Geschmackswidrigkeit streifende und so sehr aufgebauschte Kunstgriff der Stromzerteilung kann ohne weiteres ausgemerzt werden die Elektrizitätslehre erfährt damit zum mindesten keine Einbusse; an Klarheit und Haltung. — Die Wirbelströme und der Ohmsche Widerstand beanspruchen die Spannungen $E_{eff\,f}$ und $E_{eff\,w}$. Diese liegen zu S_{eff} in Phase, und bilden die Quelle zu einem Verlust an nützlicher Energie. Die Grösse der Phasenverschiebung zwischen $\mathfrak{B}_{eff}$ und S_{eff} beeinflussen $E_{eff\,f}$ und $E_{eff\,w}$ nicht, wohl aber verkleinern sie diejenige zwischen S_{eff} und E_{eff}. — Das Spannungendreieck der Fig. 51 kann mit allen sich an dasselbe knüpfenden Konsequenzen auch auf das erweiterte Schema übertragen werden, nur ist dann die Seite A B aus den drei Summanden $E_{eff\,w}$, $E_{eff\,h}$ und $E_{eff\,f}$ zusammenzusetzen. Wird dasselbe $E_{eff\,w}$ und S_{eff}, wie es der Figur 51 zu Grund liegt, gefordert, so lässt das neue Dreieck erkennen, dass dies nur durch Anwendung einer entsprechend grösseren Anschlussspannung zu erzielen ist. Der Verschiebungswinkel α wird durch die Vergrösserung von A B kleiner; beide Grössenänderungen deuten die Vermehrung der nützlichen elektrischen Leistung an. Da sich die drei Spannungsbeträge $E_{eff\,w}$, $E_{eff\,h}$ und $E_{eff\,f}$ selbst in solchen Fällen, in denen ein möglichst hoher Betrag an $E_{eff\,s}$ erzielt werden soll, nicht allzu viel herabmindern lassen, so sind in eisenerfüllten Stromkreisen auch keine Phasenverschiebungen zwischen Strom und Anschlussspannung möglich, welche auch nur angenähert an $^1/_4$ Periode heranreichen. Die traditionellen Lehrbücher pflegen dessenungeachtet sehr viel von wattlosen Wechselströmen zu schwärmen. Hinsichtlich der quantitativen Ausgestaltung der $E_{eff\,s}$-, $E_{eff\,h}$- und $E_{eff\,f}$-Spannungen ist

bemerkenswert, dass für alle drei die maximale Feldstärkenphase und die Periodenzahl von Einfluss ist.

Zur passenden Abrundung der Betrachtungen soll das auf Seite 196 angeführte Zahlenbeispiel eine entsprechende Erweiterung erfahren.

Um die dem Beispiel entsprechenden Hysteresis- und Wirbelstrom-Verluste berechnen zu können, ist zunächst notwendig, jene Grössen zu ermitteln, welche die Selbstinduktionsspannung auf rund 256 V hinaufschrauben. Hiezu dient die auf Seite 192 stehende Formulirung. Dieselbe enthält vier Grössen, über deren Dimensionirung noch keinerlei Anhaltspunkte gegeben sind und die sich deshalb auf dem Weg der reinen Rechnung nicht feststellen lassen. Erst dann, wenn noch einige Zahlenannahmen gemacht werden, ist eine lückenlose rechnerische Ermittlung möglich. Für eine passende Auswahl der möglichen Zahlenannahmen können technische oder auch wirtschaftliche Gesichtspunkte den Ausschlag geben. Im vorliegenden Fall mag als wichtig erachtet werden, dass die elektromagnetische Feldstärke bei dem Strom von 5,7 A effektiver Stärke das Maximum von 14000 Dynen nicht überschreitet. Der Wechselstrom besitze eine Periodenzahl 20 und der einen Ring von quadratischem und gleichbleibendem Querschnitt bildende Eisenkern sei aus Blechen von je 0,1 cm Dicke zusammengesetzt. Der Materialfaktor der Bleche betrage 0,0033, und ihre Durchlässigkeit habe bei $\mathfrak{B}_{max} = 14000$ den Wert 1250. Die hier angenommene maximale Feldstärke liegt auch der Hysteresisschleife der Fig. 53 zu Grund. Endlich sei noch die Achse des Eisenkernes mit der Länge 120 cm ausgestattet.

Durch die ziffernmässige Festlegung obiger Grössen sind die bei dem mechanischen Aufbau so wichtigen Werte Z und q ihrer freien Gestaltung verlustig gegangen und bedürfen daher einer Ausrechnung. Vor der Inangriffnahme derselben ist die Stromstärkenphase auszumitteln, welche die 14000 Dynen hervorbringt. Der an der Phasengrösse beteiligte Hysteresiswinkel geht aus der zweiten Steinmetzschen Formulirung hervor; diese ergibt einen Sinus von $\frac{4 \times 1250 \times 0{,}0033}{14000^{0,4}} = 0{,}362$ und einen

Winkel von 21,23°. Der Kosinus dieses Winkels hat eine Grösse von 0,932 und somit die Feldstromstärke die von $1,41 \times 5,7 \times 0,932$ = rund 7,5 A. Zwischen der maximalen und der felderzeugenden Stromstärkenphase besteht die Differenz von $8 - 7,5 = 0,5$ A. In der am Fusse der Seite 179 stehenden Gleichsetzung entsprechen allen Buchstabenbezeichnungen, mit Ausnahme von Z, gegebene Ziffern. Durch Einsetzung derselben und geeignete Umstellung ist $Z = \frac{14000 \times 120}{1250 \times 1,257 \times 7,5} = 142$. Mit Hülfe des für $E_{eff\,s}$ gültigen mathematischen Ausdruckes lässt sich q berechnen und zwar zu $\frac{256 \times 10^8}{4,44 \times 20 \times 14000 \times 142} = 145$ qcm. Aus dem Kernquerschnitt und der Kernlänge berechnet sich das Kernvolumen zu $145 \times 120 = 17400$ cbcm. Hiemit sind die Hauptdaten der konstruktiven Details der Wechselstromspule ermittelt und steht jetzt der Berechnung des Hysteresis- und Wirbelstromeinflusses nichts mehr im Wege. Die Steinmetzsche Hysteresisformel ergibt als Verlust an nützlicher Leistung $\frac{0,0033 \times 14000^{1,6} \times 17400 \times 20}{10^7}$ = rund 494 Watts. Dieser elektrischen Leistung entspricht ein $E_{eff\,h}$ von $\frac{494}{5,7} = 87$ V. Mit Hülfe von $E_{eff\,h}$ und $E_{eff\,s}$ lässt sich der Sinus des Hysteresiswinkels berechnen; derselbe ist $\frac{87}{256} = 0,34$. Die Differenz zwischen diesem Sinuswert und dem oben berechneten beträgt rund $\frac{2}{100}$. Da ein Teil dieser Differenz auf das Konto der abrundenden Ziffernangabe genommen werden muss, so ist der Genauigkeitsgrad der empirischen Steinmetzformel ein völlig ausreichender. Aus der Verlustformel für Wirbelströme folgt ein Wattquantum, welches beträgt: $\frac{1,645 \times 0,1^2 \times 20^2 \times 14000^2 \times 17400}{10^{11}}$ $= 224$ Watts. Den 224 Watts ist ein $E_{eff\,f} = \frac{224}{5,7}$ = rund 39 V zu Grund liegend. Die gesammte, mit der effektiven Stromstärkenphase zusammenfallende effektive Spannungsphase wächst

auf die respektable Höhe von 4,16 + 87 + 39 = rund 130 V an. Die Anschlussspannung muss dadurch $\sqrt{256^2 + 130^2} = 287$ V erhalten, also 31 V mehr als die anfängliche Aufgabenlösung erforderte. Nur dadurch, dass diese 31 V mehr aufgewendet werden, ist es möglich, die effektive Stromstärke von 5,7 A, trotz Hysteresis und Wirbelströme, in dem Wechselstromkreis zu erhalten. Der Leistungsfaktor cos α nimmt die Grösse $\frac{130}{287} = 0{,}453$ an. Die gesammte im Stromkreis produzirte Menge nützlicher elektrischer Energie ist alsdann $5{,}7 \times 287 \times 0{,}453 = 741$ Watts. Dieser Betrag ist derselbe, wie der, welcher aus der Summirung der drei abgerundeten Einzelverluste, also aus 24 + 494 + 224 hervorgeht. Die quantitative Bewertung der Energieverluste ist, im Verhältniss zu der namentlich bei Umformern üblichen, hoch ausgefallen. Die Ursache liegt in der geforderten elektromagnetischen Feldstärke von 14000 Dynen, welche schon an das Bereich der magnetischen Sättigung reicht.

In Anlehnung an das Zahlenbeispiel soll das Grössenverhältniss zwischen der Selbstinduktionsspannung und der an ihrer Bildung mitbeteiligten Spiralenstromstärke festgestellt und verwertet werden. Ebenso wie bei der Induktion in einem fremden Stromkreis, bietet es auch hier gewisse Vorteile, wenn der direkte quantitative Zusammenhang zwischen der induzirenden Stromstärke und der im eigenen Stromkreis induzirten Spannung in Rechnung gezogen werden kann. Das auf Seite 182 formulirte Grössenverhältniss erhielt die Bezeichnung eines Koeffizienten der gegenseitigen Induktion; dieser entsprechend, mag das hier in Frage kommende sich als Koeffizient der Selbstinduktion dem Gedächtniss anbequemen. Die Herleitung des neuen Koeffizienten erfolgt in genau derselben Weise, wie sie der Inhalt der Seite 182 erkennen lässt. Bei der Vermischung der $E_{eff\,s}$- mit der $\mathfrak{B}_{max}$-Formel darf allerdings nicht ausser Acht gelassen werden, dass die die Formeln ausmachenden Grössen nur Bezug auf einen Stromkreis haben. Der somit ohne weiteres angebbare Koeffizient der Selbstinduktion besitzt die Form:

$$\frac{E_{eff\,s}}{S_{eff}} = \frac{7{,}87 \times \sim \times Z^2 \times q}{10^8 \times l} \times \mu\,\mathfrak{B}_{max}\,.$$

Werden beide Koeffizientenarten einem Vergleich unterzogen, so fällt sofort ihre Ähnlichkeit auf. Ein Unterschied und zwar ein charakteristischer ist indessen vorhanden. Während zuvor Z_1 und Z_2, also die Windungszahlen zweier Spulen auf das Grössenverhältniss ihren Einfluss ausübten, ist jetzt nur die Windungszahl einer Spule in Anschlag zu bringen. Da diese eine Spule aber gleichzeitig eine felderzeugende und eine induzirende Wirkung äussert, so muss ihre Beeinflussung als Quadrat der Windungszahl zum Ausdruck gelangen. Hinsichtlich der Eigenschaften des Koeffizienten der Selbstinduktion gilt dasselbe, was auf Seite 182 und flgd. über den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion ausgeführt wurde. Danach darf der Selbstinduktionskoeffizient nicht als eine konstante, sondern nur als eine von S_{eff} abhängige Grösse in exakt seinsollenden Zahlenproblemen figuriren. Da die $\mathfrak{B}_{max}$-Gleichsetzung nur für eisengeschlossene Stromkreise Gültigkeit besitzt, so kann auch der obige Koeffizientenausdruck nur auf solche Stromkreise anwendbar sein. Darauf ist Bedacht zu nehmen, weil in der Elektrotechnik auch solche Wechselstromkreise Verwendung gefunden haben, deren Feld zum Teil in der Luft, zum Teil im Eisen gebildet wird und hiefür abweichend gestaltete Selbstinduktionskoeffizienten Geltung besitzen. Zum Schluss der Betrachtungen über den Selbstinduktionskoeffizienten, welche mehr zur Kennenlernung der in den Lehrbüchern üblichen Hervorhebungen, als zur Befriedigung eines Bedürfnisses gepflogen wurden, soll der im obigen Zahlenbeispiel bei der Durchlässigkeit 1250 vorhandene Koeffizient ziffernmässig festgestellt werden. Nach Einsetzung der entsprechenden Zahlenwerte in die obige Formulirung und Ausrechnung derselben ergibt sich für diesen die Zahl 46. [1]).

[1]) Es wird gut sein, darauf hinzuweisen, dass auch der oben formulirte Selbstinduktionskoeffizient nicht mit dem übereinstimmt, was herkömmlicherweise diesen Namen führt. Der traditionelle Koeffizient umfasst den Ausdruck $\frac{1{,}257 \times Z^2 \times q}{10^8 \times l} \times \mu_{\mathfrak{B}_{max}}$. $6{,}28 \times \sim$ sind demnach nicht mit eingeschlossen. In Hinwendung zum Zahlenbeispiel muss sich demnach der übliche Koeffizient auf $\frac{46}{6{,}28 \times \sim}$ = rund 0,37 beziffern. Zu welcher Bedeutung der traditionelle Koeffizient in der Elektrizitätslehre hinaufgeschraubt wurde, geht am besten aus der Thatsache hervor, dass man denselben seiner unver-

Das Problem, welches eine von Wechselströmen durchflossene Drahtspirale darbietet, ist mit dem Bisherigen soweit zur Erledigung gebracht, dass nicht nur die einzelnen Vorgänge scharf auseinander gehalten werden können, sondern auch ihr Zusammenbau zur Gesammtheit der Erscheinungen keine Schwierigkeiten bereitet. Eine in mancher Beziehung wertvolle Vervollständigung erfährt das Problem durch das Studium jener Gleichgewichtszustände, welche erhalten werden, wenn jeweils eine der Hauptgrössen, also z. B. der Ohmsche Widerstand oder der Selbstinduktionskoeffizient eine Reihe von Zahlenwerten durchläuft. Da die dem Buche gezogenen Grenzen ein näheres Eingehen auf diesen Gegenstand nicht zulassen, so sei derselbe dem Leser zur selbständigen Durcharbeitung anheimgegeben. Um die gesammten, in einem Umformer sich abspielenden Vorgänge lückenlos zur Darstellung bringen zu können, ist es jedoch notwendig, die an der Spirale gewonnenen Ergebnisse wenigstens nach der Richtung zu erweitern, dass der Einfluss des Zusammenhanges der Spirale mit den übrigen, den Stromkreis ergänzenden Bestandteilen zur Kenntniss gelangt. Also nicht mehr die in der isolirt gedachten Spirale auftretenden Grössen und Erscheinungen, sondern die des gesammten Stromkreises sind es, welche im Nachstehenden das Interesse in Anspruch nehmen werden. Obschon sich alle möglichen Stromkreisarten als Entwicklungsschema verwenden lassen, werden doch in erster Linie diejenigen ins Auge zu fassen sein, welche der primären bezw. der sekundären Umformerspule angehören. Diese beiden Stromkreise können im Einzelnen sehr verschieden und umfangreich geartet sein; im Grossen und Ganzen umfasst aber der erstere stets eine Stromquelle, Verbindungsleitungen und die Spule selbst, während sich

---

kennbaren Koeffizientennatur entkleidete und aus ihm die Maasszahl einer besonderen Maasseinheit schuf. Als Maasseinheit gilt die noch um 10 vervielfachte Zahl 10^8, also 10^9 und erhielt dieselbe den Taufnamen Henry. Dieser Einheit zufolge ist natürlich der ebenfalls mit 10 vervielfachte Rest des obigen Ausdruckes, also $\frac{12{,}57 \times Z^2 \times q}{l} \times \mu_{\mathfrak{B}_{max}}$, wenn er durch 10^9 dividirt wird, die Maasszahl, also diejenige Zahl, welche angibt, wieviel Henrys den Selbstinduktionskoeffizienten ausmachen. Der Zahl 0,37 ist demnach gleichzeitig die Bedeutung von 0,37 Henrys beizulegen.

der letztere aus der Sekundärspirale, Verbindungsleitungen und mindestens einem Nutzapparat zusammensetzt. Schon ein wenig Überlegung lässt erkennen, dass im primären Gesammtstromkreis nur die induzirende Leiterspirale für den Umformungsvorgang in Frage kommen kann. Anders jedoch im Sekundärkreis. Dort bestimmt die Beschaffenheit und Anzahl der Nutzapparate das Energiequantum, welches der Umformer zu übertragen hat, und somit auch die damit in Zusammenhang stehenden Grössen. Demgemäss genügt es, wenn nur der Sekundärstromkreis des Umformers als Unterlage der Betrachtungen in Verwendung kommt. Aber selbst dieser Stromkreis muss erst auf einfachste Formen zurückgeführt werden, wenn das Charakteristische nicht von dem Nebensächlichen überdeckt werden will. Die in Wechselstromkreisen üblichen Nutzapparate lassen sich in zwei wichtige Gruppen sondern. Die eine Gruppe umfasst alle jene Einrichtungen, in denen neben dem Ohmschen Widerstand auch der Selbstinduktionskoeffizient eine Rolle spielt. Hiezu gehören z. B. die Elektromotoren und die Bogenlampen. Zu der anderen Gruppe sind diejenigen Apparate zu rechnen, welche nur Ohmschen Widerstand aufzuweisen haben, also vor allen Dingen die Glühlampen. Dieser doppelten Gruppirung entsprechend empfiehlt es sich, zwei elementare Stromkreisschemas in Benützung zu ziehen. Das eine Schema setzt sich aus der Sekundärspule, den Verbindungsleitungen und einem Elektromotor in Hintereinanderschaltung zusammen. Das andere ist ebenso gestaltet, nur dass an Stelle des Elektromotors eine Glühlampe einzufügen ist. Die Annahme einer einfachen Hintereinanderschaltung besitzt den Vorteil, in den verschiedenen Stromkreisteilen mit derselben Stromstärke rechnen zu können. Zur Vereinfachung der Betrachtungen, und um Vergleiche zwischen den beiden Stromkreisen anstellen zu können, sind noch folgende Voraussetzungen zu machen. Beide Stromkreise mögen völlig gleichgestaltete Sekundärspulen und Verbindungsleitungen besitzen. In beiden Stromkreisen sei E_{eff_2} und S_{eff_2} von derselben Grösse. Die Ohmschen Widerstände und auch die eventuellen Selbstinduktionskoeffizienten, Hysteresis- und Wirbelstromverluste der einzelnen Teile beider Stromkreise seien bekannt. Die Annahme der Stromstärken-

gleichheit in dem Elektromotor und der Glühlampe ist in Wirklichkeit nicht gut aufrechtzuerhalten. Eine Stromstärke von z. B. 1—2 A ist für eine Glühlampe schon sehr viel, während sie für einen mässig grossen und belasteten Elektromotor so gut wie nichts zu bedeuten hat. Da jedoch durch Parallelschaltung einer grösseren Anzahl Glühlampen der gesammte Stromverbrauch leicht beliebig vergrössert werden kann, so ist nur nötig, die im Schema aufgeführte Lampe als eine derartige Kombination anzusehen, um dem Vorwurf eines unmöglichen Vergleiches aus dem Weg zu gehen. — Im Nachfolgenden soll zunächst der Stromkreis mit dem Elektromotor näher untersucht werden.

Die von dem primären Feld in der Sekundärspirale induzirte E_{eff_2}-Spannung bildet die Triebkraft für den im sekundären Stromkreis fliessenden Strom. Sie hat demnach für diesen dieselbe Bedeutung, wie die von der Stromquelle hervorgerufene elektromotorische Kraft für den Primärkreis. Selbstverständlich kann die E_{eff_2}-Spannung nur soviel Stromstärke zur Entstehung bringen, als die sich der Bewegung entgegenwirkenden Widerstände zulassen. Ist eine Stromstärke von bestimmter Grösse in dem Elektromotor erforderlich, so ist, da die Widerstände als gegeben angenommen wurden, die Wahl von E_{eff_2} nicht mehr freigestellt, sondern sie kann nur auf den dem mathematischen Zusammenhang entsprechenden Ziffernbetrag fallen. Die Bestimmung von E_{eff_2} ist anscheinend recht einfach, da ja nur die Spannungsabfälle der drei Stromkreisbestandteile zunächst ermittelt und alsdann zu einem Ganzen vereinigt zu werden brauchen. Bei näherer Betrachtung gestaltet sich jedoch die Aufgabe beträchtlich schwieriger; nicht nur, dass die Berechnung der Spannungsabfälle an sich mit Umständlichkeiten verknüpft ist, sondern auch die Zusammensetzung der einzelnen Teile zu E_{eff_2} lässt sich nicht, wie in einem Gleichstromkreis, mit Zuhilfenahme der einfachen Operation des Zusammenzählens abmachen. Die beträchtliche Selbstinduktion des Elektromotors und die geringere der Spirale bewirken zeitliche Verschiebungen zwischen den Wellen der Stromstärke und der Spannungsabfälle, deren Grösse in der Regel gegenseitig Differenzen aufzuweisen hat. Da ausser-

dem der Abfall in den Verbindungsleitungen so gut wie in Phase mit der Stromstärke angenommen sein möge, und da der Strom in allen drei Stromkreisbestandteilen in gleichen Zeitpunkten dieselben Stärkenphasen umfasst, so geht daraus hervor, dass auch unter den Wellen der Spannungsabfälle zeitliche Verschiebungen vorhanden sind, die, wie gesagt, die arithmetische Addition verbieten. Trotz dieser Schwierigkeiten lässt sich doch mit Zuhilfenahme der zeichnerischen Darstellung das E_{eff_2} verhältnissmässig leicht gewinnen. Es ist der Zweck der Figur 54, dieser Behauptung Ausdruck zu verleihen. In dieser Figur entspricht I dem Stromkreis mit dem Elektromotor und II dem mit der Glühlampe. Dem Aufbau der Figur liegt das Spannungendreieck der Seite 194 zu Grund. Die Längen der Dreiecksseiten machen auf Respektirung thatsächlicher Werte keinen Anspruch; es wurde lediglich die Erzielung möglichster Deutlichkeit angestrebt und danach die Figur entworfen.

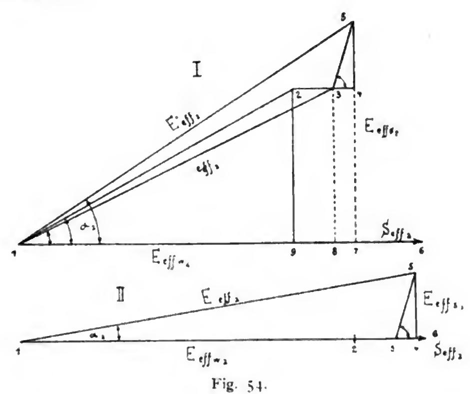


Fig. 54.

Werden zunächst die Vorgänge in der Sekundärspule ins Auge gefasst, so tritt namentlich der Aufwand zweier Spannungsbeträge hervor, von denen der eine in Phase, der andere um $^1/_4$ Periode verschoben zum Strom liegt. Das erstere Voltquantum dient zur Überwindung aller nützliche Energie verzehrenden

Hemmungen, also in erster Linie zu der des Ohmschen Widerstandes. Das letztere hat den Forderungen der Selbstinduktion das Gleichgewicht zu halten. Beide Spannungsbeträge machen einen Abfall im Stromkreis aus, der sich aus dem Spannungendreieck 3, 4, 5 als Seite 3, 5 ergibt. Da die sekundäre Umformerspule in der Regel nur aus relativ wenigen Windungen besteht, so können auch die Dreiecksseiten nur minimale Längenausdehnungen annehmen. Da die Seite 3, 4 dem nützliche Energie benötigenden Spannungsaufwand entspricht, so gibt der in dem Dreieck durch einen Bogen angedeutete Winkel das Maass für die zeitliche Verschiebung zwischen der Stromstärkenwelle und der Unterwelle des der Spule zukommenden Spannungsabfalles an. — In den Verbindungsleitungen, welche nur bei beträchtlicher Länge eine nennenswerte Selbstinduktion besitzen, besteht der gesammte Spannungsabfall lediglich aus Phasen, die mit den entsprechenden der Stromstärkenwelle zeitlich zusammenfallen. Der Verschiebungswinkel des zweiten Stromkreisbestandteiles ist daher Null, und die bildliche Darstellung erweitert sich um die in die Verlängerung von 3,4 fallende Gerade 2,3. Es entspricht 2,3 dem Produkt aus Stromstärke und Ohmschen Widerstand der Verbindungsleitungen. — In dem elektrische Energie verzehrenden Elektromotor sind sämmtliche, in Wechselstromkreisen namhaft gemachten Erscheinungen in quantitativ erheblichem Maasse vertreten. Es sind daher von E_{eff_2} die Wirkungen des Ohmschen Widerstandes, der Hysteresis, der Wirbelstrombildung, der mechanischen Arbeitsleistung und der Selbstinduktion zu bewältigen. Da alle diese Wirkungen, mit Ausnahme derjenigen der Selbstinduktion, in vollem Umfang nützliche elektrische Leistungen beanspruchen, so müssen ihre äquivalenten Spannungsanteile sämmtlich mit der Stromstärke in Phase liegen. Die Gesammtheit der Anteile ist in der Figur 54 durch die Strecke 1,9 dargestellt. Dieselbe liegt parallel zu 2, 3, 4 und ihr Endpunkt 9 befindet sich auf derselben Höhe wie der Endpunkt 2. Die Strecke 2, 9, welche den Abstand der beiden Parallelen ausmacht, repräsentirt das Maass der in dem Elektromotor in Frage kommenden Selbstinduktionsspannung. Aus 1, 9 und 9, 2 ergibt sich, gemäss dem Dreiecksschema, der Spannungsabfall des Motors in der Seite 1, 2.

Der zwischen 1, 9 und 1, 2 eingetragene Bogen bringt in seiner Grösse die durch die Selbstinduktion verursachte zeitliche Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Verbrauchsspannung des Motors zum Ausdruck. Darin, dass in der Figur die drei Geraden 1, 2; 2, 3 und 3, 5 eine gebrochene Linie bilden, liegt die Bestätigung der bereits angeführten Thatsache, dass die Wellen der Spannungsabfälle gegenseitig verschoben sind. Die aus der Vereinigung dieser Wellen hervorgehende E_2-Welle kann in ihrer effektiven Phase aus der gebrochenen Linie sehr leicht dargestellt werden. Überlegung und Messung zeigen nämlich, dass die gerade Verbindungslinie zwischen den Punkten 1 und 5 dem Werte von E_{eff_2} gleichkommt. Wird das Gebilde der aneinandergereihten Spannungen durch die gestrichelten Linien 4, 7; 3, 8 und 9, 7 ergänzt, so geht daraus das grosse Dreieck 1, 7, 5 hervor, an das sich eine Auffassungsregel von praktischem Wert knüpft. Der sekundäre Stromkreis kann, trotz des verschiedenen Charakters seiner drei Bestandteile, als ein der isolirten Spule analoges, einheitliches Gebilde angesehen werden, dessen Wattspannung 1, 7 = $E_{eff\,w_2}$, der Summe der Wattspannungen der Bestandteile entspricht, während sich die Selbstinduktionsspannung 7, 5 = $E_{eff\,s_2}$ als der Summe 9, 2 + 4, 5 entsprechend ausweist. Wird in der Figur auch noch die Stromstärke durch die mit $E_{eff\,w_2}$ zusammenfallende Gerade 1, 6 zur Darstellung gebracht, so ist damit das wichtigste Ergebniss der Untersuchungen verbildlicht, denn die Figur zeigt nun, dass zwischen E_{eff_2} und der effektiven Stromstärke eine durch den Winkel α_2 ausgedrückte zeitliche Verschiebung vorhanden ist. Die in den sekundären Stromkreis übertragene nützliche elektrische Leistung beträgt $E_{eff_2} \times S_{eff_2} \times \cos \alpha_2$. Besonderes Interesse hat in der Figur 54 I noch die Strecke 1, 3 zu beanspruchen. Sie bringt die sekundäre Anschlussspannung e_{eff_2} zum Ausdruck, also diejenige Spannung, welche noch für den äusseren sekundären Stromkreis zu Arbeitsleistungen disponibel bleibt. Selbstverständlich ist e_{eff_2} kleiner als E_{eff_2}; dasselbe Grössenverhältniss besteht auch zwischen den

Verschiebungswinkeln. Da das Dreieck 3, 4, 5, bei seiner Anwendung auf den wirklichen Verhältnissen angepassten Stromkreis, gegenüber dem Übrigen in recht bescheidenen Dimensionen zu figuriren pflegt, so lässt sich, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen, die übertragene nützliche Energie auch durch $e_{eff_2} \times S_{eff_2} \times$ cos des zugehörenden Winkels in Rechnung ziehen.

In Hinwendung zum Stromkreis mit der Glühlampe gelten für die Spule und die Verbindungsleitungen dieselben Entwicklungen und bildlichen Darstellungen, wie bei dem Motorenstromkreis. Das Dreieck 3, 4, 5 und die Strecke 2, 3 können daher ungeändert auf die Figur 54 II übertragen werden. Die unterschiedliche Verhaltungsart beginnt erst mit der Glühlampe. Da in diesem Nutzapparat nur der Ohmsche Widerstand als spannungsverzehrende Hemmung in Betracht kommen kann, so ist zwischen der Stromstärke und dem Spannungsabfall der Glühlampe auch keine zeitliche Verschiebung möglich. In der Figur setzt sich an den freien Endpunkt der Geraden 4, 2 nur die gleichgerichtete Verlängerung 2, 1, und zwar in einer solchen Ausdehnung, dass die E_{eff_2} entsprechende Gerade 1, 5, gemäss Annahme, dieselbe Länge wie in der Figur 54 I besitzt. Wird noch die ebenfalls in I und II gleiche Stromstärke, mit 1, 4 zusammenfallend, eingetragen, so ist auch diese bildliche Darstellung ihrer Vollendung entgegengeführt. Sie gestattet den für den Glühlampenstromkreis wichtigen Schluss zu ziehen, dass in ihm, bei gleichem E_{eff_2} und S_{eff_2}, wie im Motorenstromkreis, ein beträchtlich grösseres Quantum nützlicher elektrischer Leistung umgesetzt wird. Im äusseren Stromkreis, der unter der Spannung e_{eff_2} = Gerade 1, 2 steht, entspricht die nützliche Leistung dem Produkt $e_{eff_2} \times S_{eff_2}$; im gesammten Stromkreis hingegen $E_{eff_2} \times S_{eff_2} \times \cos \alpha_2$. Sollen beide Stromkreise in der Energieumsetzung gleich leistungsfähig geschaffen werden, so führt diese Forderung ganz allgemein zu der bereits hervorgehobenen entsprechenden Grössergestaltung der mit Selbstinduktion behafteten Stromkreisbestandteile. Mit den bisherigen Betrachtungen ist übrigens die Erklärung für eine den Nichteingeweihten bei zusammengesetzten Stromkreisen sehr

leicht irreführende Thatsache gegeben. Dieselbe besteht darin, dass bei Bestandteilen, die praktisch frei von Selbstinduktion sind, mit der Messung ihres Spannungsabfalles und der Stärke des durchfliessenden Stromes auch alle Daten zur Wattbestimmung gegeben sind, wie gross auch im Stromkreis, als Ganzes aufgefasst, die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke und Gesammtspannung sein mag. — Die Resultate des Grundschemas genügen, um auch wesentlich erweiterte Stromkreise bewältigen zu können. Von den vielen möglichen Stromkreiszusammensetzungen haben manche eine sehr ausgedehnte praktische Verwendung gefunden. Auch interessante Schlussfolgerungen lassen sich an die verschiedenen Arten, Nutzapparate in grösserer Anzahl in Betrieb zu nehmen, knüpfen. Eine, von der im Folgenden Gebrauch gemacht wird, lässt sich dahin ausdrücken, dass, wenn in einem Stromkreis noch so viele Nutzapparate von gleichem Selbstinduktionskoeffizienten und Ohmschen Widerstand parallel geschaltet werden, dadurch wohl die Stromstärke, nicht aber der Phasenverschiebungswinkel zwischen dem Spannungsabfall und der gesammten Stromstärke geändert wird.

Ehe nun die Betrachtungen über den Umformer zu ihrem Abschluss gebracht werden, ist es angezeigt, nochmals einen kurzen zusammenfassenden Rückblick zu nehmen. Zunächst wurde der Vorgang der Wechselstrominduktion und der der Rückwirkung des induzirten Stromes auf den induzirenden Stromkreis in Behandlung genommen und zwar unter der Voraussetzung, dass nur der Einfluss des Ohmschen Widerstandes beider Spulen in Betracht kommt. Drei von den hiebei gewonnenen Ergebnissen beanspruchen eine nochmalige Hervorhebung. Es sind dies die Gleichheit der beiden induzirenden Felder und die quantitative Ausgestaltung der gleichartigen Leistungsfaktoren, gemäss dem Gesetz der Windungszahlen, also die Gleichheit der Quotienten $\frac{Z_1}{Z_2}$ und $\frac{e_1}{E_2}$ bezw. $\frac{S_2}{S_1}$. Des Weitern wurden die in einer eisenerfüllten und von Wechselströmen durchflossenen Leiterspirale auftretenden Nebenerscheinungen der Selbstinduktion, Hysteresis und Wirbelstrombildung eingeführt und ihr Einwirken auf den Gleichgewichtsvorgang geschildert. Endlich wurde noch die Aufgabe in Angriff genommen, in einem aus verschiedenartigen Bestand-

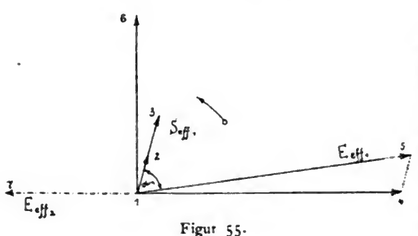
teilen zusammengesetzten Wechselstromkreis nicht nur die für eine angenommene Stromstärke erforderliche Stromquellenspannung, sondern auch die gegenseitige zeitliche Verschiebung festzustellen. Da sich das Beispiel der Wechselstromspule vollinhaltlich auf die primäre Seite eines sekundär geöffneten, also dort stromlosen Umformers anwenden lässt, und da der kombinirte Stromkreis das allgemeine Schema für die belastete sekundäre Seite abgibt, so leuchtet ein, dass jetzt alle Mittel vorhanden sind, um sowohl die Rückwirkung einer mit Selbstinduktion behafteten sekundären elektrischen Leistung auf den primären Stromkreis ausmitteln, als auch die dieser Leistung entsprechenden primären Grössen mit den übrigen, in der primären Spule zu beachtenden Zusatzwerten zu einem Ganzen vereinigen zu können. Mit der Darstellung dieser Aufgaben sind die belangreichsten Vorgänge im Umformer zur Abwicklung gebracht, und ist es alsdann ein Leichtes, alle Arten Folgerungen und Weiterungen auf diesem Fundament aufzubauen.

Da im Nachfolgenden die Vergleichung verschiedener Belastungszustände gewissermassen den roten Faden in der Fülle der Schlussfolgerungen verkörpert, so mag zur Erleichterung derselben die Voraussetzung platzgreifen, dass die mit ihren Phasen Sinuswellen bildende Anschlussspannung E_1 sich in ihrer Grösse gleichbleibt und an ein und demselben Umformerapparat seine von der sekundären Belastung abhängenden Wirkungen hervorbringt. Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit ist es auch hier vorteilhaft, sich der bildlichen Darstellung zu bedienen und zwar speciell derjenigen, bei welcher die Zeit durch Winkel zum Ausdruck gebracht wird. Da sich die Grösse der zeitlichen Verschiebung zwischen den verschiedenen im Umformer auftretenden Spannungen, Stromstärken und Feldstärken durchweg innerhalb des Abschnittes einer Periode feststellen lässt, und dieser Spanne Zeit ein Winkel von 360^0 entspricht, so folgt hieraus, dass sich die einzelnen Phasen bei dem zeichnerischen Entwurf um den Scheitelpunkt des Vollwinkels gruppiren werden. Um die Verschiebungswinkel und auch die Phasenwerte gegenseitig leicht vergleichen zu können, dürfen nur gleichartige Phasen zur Verbildlichung gelangen, also entweder die maximalen oder, wie es nachstehend der Fall ist, die effektiven Phasen. Wo es sich um

zeichnerische Vereinigung zeitlich nicht zusammenfallender, gleichartiger Grössen handelt, geschieht dieselbe unter Zuhilfenahme des Dreieckschemas, welches auch dann noch anwendbar bleibt, wenn nicht zwei, gerade um $^1/_4$ Periode verschobene Phasen zu einem Ganzen zusammenzubauen sind, wobei allerdings die rechtwinklige Form des Dreiecks in die schiefwinklige übergeht. Die Geraden, welche die Phasen skizziren, sind an ihrem freien Ende mit Pfeilspitzen ausgerüstet und dann strichpunktirt, wenn sie Grössen des sekundären Umformerteiles entsprechen. Hülfslinien werden punktirt. Die Längenmaassstäbe der E-, S-, und 𝔅-Phasen können verschieden gross angenommen werden, und ist die Übersichtlichkeit und die Raumersparniss bei der Zeichnung für die Wahl derselben ausschlaggebend. Einmal gewählte Maassstäbe sind für die Phasen derselben Gattung unbedingt beizubehalten. Zu bemerken ist noch, dass es auch hier weniger auf Einhaltung von Grössenverhältnissen ankommt, wie sie der im Betrieb befindliche Umformer aufzuweisen pflegt, sondern, dass die möglichst markante Hervorhebung des dem Umformer Charakteristischen als Richtschnur für die Grössenbemessung zu dienen hat. Um sich das zeichnerische Hülfsmittel richtig dienstbar zu machen, soll dasselbe zunächst auf das Beispiel eines im sekundären Stromkreis stromlosen Umformers Anwendung finden. Da für diesen Betriebszustand auf Seite 215 und flgd. bereits eine eingehende Zusammenfassung enthalten ist, so kann sich die Aufmerksamkeit des Lesers ganz auf das Eigenartige der Übertragung ins Bildliche konzentriren. Der Umformer sei in seiner mechanischen Ausführung so geartet gedacht, dass die Windungszahl der primären Spule das Doppelte der sekundären beträgt.

Indem die primäre Feldstärke des unbelasteten Umformers der Darstellung als Ausgangspunkt dienen mag, verbildlicht sich ihre effektive Phase durch die Gerade 1, 6. Zwischen der Feldstärke- und der Stromstärkenwelle besteht in Folge der Hysteresis eine zeitliche Verschiebung und zwar eilt die letztere Welle der ersteren zeitlich voraus. Um in der Winkeldarstellung erkennen zu können, ob eine Phase der anderen zeitlich vorauseilt, ist in der Gruppirung der Phasenlinien um den Scheitelpunkt ein bestimmtes Prinzip einzuhalten. Für die Figur 55 werde angenommen, dass die vorauseilende Phase, von rechts nach

links gezählt, immer als erste figurirt. Zur raschen Orientirung über die Art der gegenseitigen, zeitlichen Lagerung der Phasen dient der eingezeichnete, gekrümmte Pfeil, dessen Richtung, wie nebenbei bemerkt sein mag, mit derjenigen des Zeitlinienpfeiles übereinstimmt. Das 1, 6 entsprechende Wechselfeld löst ein bestimmtes Quantum Selbstinduktion und Hysteresis aus und wird dadurch die Ursache einer Spannungsinduktion. Die effektive Phase dieser Spannung eilt 1, 6 um 90° nach, fällt also in die Richtung 1, 7. Da es die Aufgabe der Anschlussspannung ist, dieser Gegenspannung das Gleichgewicht zu halten, so muss sie einen 1, 6 um 90° voreilenden und der vereinigten Hysteresis- und Selbstinduktionsphase grössengleichen effektiven Anteil aufweisen. Dieser ist in der Figur durch die Gerade 1, 4 dargestellt. Die effektive Phase des Spulenstromes besitzt gegen diejenige des Feldes eine durch die Steinmetzsche Formel feststellbare zeitliche Voreilung. Dieselbe ist in der Figur 55 durch den Winkel 6, 1, 3 zum Ausdruck gebracht; die effektive Stromstärkenphase muss alsdann in die Richtung von 1, 3 weisen. Ihre Grösse entspreche der Länge 1, 3. Die zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes und der Wirbelstrombildungen erforderlichen Spannungsbeträge fallen mit der Stromstärke zeitlich zusammen. Ihre Gesammtphase sei durch die mit 1, 3 gleichgerichtete Strecke 1, 2 der Figur zugänglich gemacht. Aus 1, 4 und 1, 2 lässt sich die gesammte Anschlussspannung gewinnen, und zwar in der Weise, dass in Punkt 4 eine zu 1, 2 parallele Hülfslinie gezogen und 1, 2, von 4 aus, auf derselben abgetragen wird. Die 1, 4 und 4, 5 zu einem schiefwinkligen Dreieck ergänzende Seite 1, 5 repräsentirt in Grösse und Richtung die effektive Phase der Anschlussspannung, also E_{eff_1}. Die zeitliche Verschiebung, welche



Figur 55.

für den primären Leistungsfaktor $\cos \alpha_1$ maassgebend ist, wird durch den Winkel 3, 1, 5 verbildlicht. Damit ist das Leergangsschema der primären Seite erschöpft und es fehlt zur Vervollständigung nur noch die Einzeichnung der in der ungeschlossenen Sekundärspule induzirten Spannung E_{eff_2}. Da ein und dasselbe Feld in beiden Spulen induzirend wirkt, Z_2 jedoch nur die Hälfte von Z_1 ausmacht, so kann das der strichpunktirten Geraden 1, 7 äquivalente und 1, 6 um 90° nacheilende E_{eff_2} nur halb so gross wie die primäre Induktionsspannung sein. In der Figur beträgt daher die Länge von 1, 4 das Doppelte von der von 1, 7.

Die wenigen zeichnerischen Manipulationen, wie sie der Figur 55 zu Grund liegen, genügen vollständig, um die nun folgenden Betrachtungen über den belasteten Umformer ebenfalls der Unterstützung durch Figuren teilhaft werden zu lassen. Die neuen Gebilde zeichnen sich lediglich durch eine grössere Anhäufung der soeben kennengelernten Konstruktionselemente aus.

Für die Beurteilung der durch sekundäre elektrische Leistungen veranlassten Rückwirkungen ist eine voraufgehende Orientirung über diejenigen primären Grössen, welchen, gemäss den gegebenen Betriebsverhältnissen, die Aufgabe der Gleichgewichtshaltung zufällt, sehr notwendig. Hiebei interessiren hauptsächlich drei Arbeitsarten. Es dokumentire sich die primäre Änderung der Watterzeugung entweder nur durch die entsprechende Änderung der primären Stromstärke, oder nur durch die der primären Anschlussspannung, oder endlich durch die beider Grössen. Die ersten zwei Gleichgewichtssysteme sind nur möglich, wenn die primäre Anschlussspannung bezw. die primäre Stromstärke unveränderlich gehalten wird. Von hervorragend praktischer Bedeutung ist nur das System mit der konstanten Anschlussspannung und ist mit seiner Darstellung dem Leser genug geboten, um ihm im Bedarfsfall die selbstständige Behandlung der andern Systeme zu ermöglichen. Da bei einem Umformer mit konstantem E_{eff_1} Änderungen seines Gleichgewichtszustandes nur von dem sekundären, äussern Stromkreis ausgehen können, so ist es vorteilhaft, die Entwicklungen mit diesem zu beginnen und S_{eff_2} in Grösse und Richtung anzunehmen. In der Figur 56, in welcher die

Pfeillinien 1, 3; 1, 6; 1, 4 und 1, 7 den analogen der Figur 55 in Sinn und Art der Anordnung entsprechen, ist S_{eff_2} durch 1,8 dargestellt. Diese Phase eilt E_{eff_2} um den Winkel α_2 = Winkel 7, 1, 8 nach. Die gesammte sekundäre Leistung beträgt $E_{eff_2} \times S_{eff_2} \times \cos \alpha_2$; dieselbe muss in vollem Umfang primär wieder zum Vorschein kommen. Diese Übertragung kann sich ohne Zweifel nur in der Weise vollziehen, dass sich dem Strom 1, 3 noch ein weiterer Betrag hinzugesellt und aus beiden Teilen ein Gesammtstrom resultirt, welcher in Vervielfachung mit E_{eff_1} und dem primären Leistungsfaktor ein Produkt ergibt, welches der Summe von Sekundär- und Leerlaufsleistung gleichkommt. Zunächst folgt aus den früheren Betrachtungen, dass das sekundäre Spulenfeld primär eine Gegenspannung ins Leben ruft, deren Phasen den gleichartigen des Feldes um ¹/₄ Periode später folgen. Da, wie schon vorweggenommen sein mag, durch den Sekundärstrom kein Zuwachs an Hysteresis verursacht wird, so müssen die effektiven Phasen von Feld und Strom zusammenfallen, und folglich die effektive Phase der Gegenspannung auch S_{eff_2} um 90° nacheilen. Die Gegenspannung wird demnach in der Figur mit der Geraden 1,9 übereinstimmen. Dieser primären Gegenspannung wird eine ebenso grosse und entgegengesetzt gerichtete, also um 180° verschobene Antriebsspannung das Gleichgewicht halten. Ihr e_{eff_1} entspricht 1, 10. Dieser Aufwand an Antriebsspannung kann in Folge der Unveränderlichkeit von E_{eff_1} nur dadurch bestritten werden

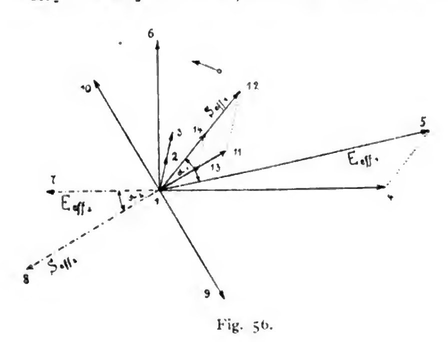


Fig. 56.

dass ein Stromzuwachs auftritt, dessen Feld die Spannung 1, 10 in Grösse und Richtung zu induziren vermag. Da dieser Stromzuwachs ebenfalls keine Hysteresisbildung im Gefolge hat, so fallen Feld und Strom zeitlich zusammen, und die effektive Phase des letzteren erhält zu 1, 10 eine Voreilung von 90°, so dass ihre Gruppirung durch die Linie 1, 11 zum Ausdruck kommt. Die Figur 56 lässt ohne weiteres erkennen, dass diese Linie der Linie 1, 8 gerade entgegengesetzt gerichtet ist. Die Welle des sekundären Feldes und die des primären Zusatzfeldes werden demnach zwar dasselbe Zeitlinienstück beanspruchen, aber sich zu demselben diametral anordnen. Wird die Thatsache in Veranschlagung gebracht, dass beide Felder quantitativ gleiche Induktionsspannungen hervorrufen, so führt dieselbe zu dem Schluss, dass die Wellen auch formgleich sind. Mit dieser Erkenntniss, welche für jeden Belastungszustand des Umformers Geltung besitzt, sind praktisch sehr wichtige Folgerungen verknüpft. Nicht nur, dass mit derselben die Begründung des hysteresisfreien Wirkens der Felder gegeben ist, sondern sie zeigt auch, dass für den Entwurf des Umformers und für die Berechnung seiner Hysteresis- und Wirbelstromverluste nur das Leerlaufsfeld 1, 6 eine Rolle spielt. Da die gleichen Felder in ein und demselben Eisenkern auftreten, so setzen dieselben primär und sekundär gleiche Ampèrewindungen voraus. An der Bildung der Ampèrewindungen sind in der primären Spule doppelt so viel Windungen, wie in der sekundären beteiligt. Es kann daher die Ampèrezahl des primären Stromzuwachses nur die Hälfte von S_{eff_2} und somit auch 1, 11 nur diesen Betrag von 1, 8 ausmachen. Das Leergangsschema brachte die Erkenntniss, dass die Spannung 1, 4 zur Gleichgewichtshaltung der von 1, 6 induzirten primären Spannung, welche in die Richtung von 1, 7 fällt, zu dienen hat. Da die sekundäre Induktionsspannung 1, 7 ebenfalls von 1, 6 ins Leben gerufen wird, so ist die Schlussfolgerung naheliegend, dass 1, 4 auch zur Ausgleichung der Rückwirkung der nur halb so grossen Spannung 1, 7 in Betracht kommen muss. Indem die Figur 56 auf den ersten Blick die Gleichheit der Winkel 7, 1, 8 und 11, 1, 4 erkennen lässt, ist damit das Schlussglied in eine Entwicklungsreihe eingefügt, welche als Gesammtes den

höchst bedeutsamen Satz ergibt, dass auch dann noch das Gesetz der Windungszahlen seine Gültigkeit beibehält, wenn im sekundären Umformerstromkreis eine Phasenverschiebung zwischen E_{eff_2} und S_{eff_2} besteht, also die Energieübertragung mit einer derartigen Komplikation behaftet ist. Ebenso wie das Gesetz der Windungszahlen, bleiben aber somit auch alle jene früheren Folgerungen, welche sich an dieses Gesetz anlehnen, sinngemäss bestehen. Die Gleichsetzungsmöglichkeit der elektrischen Leistungen $E_{eff_2} \times S_{eff_2} \times \cos \alpha_2$ und $1{,}4 \times 1{,}11 \times \cos 11, 1, 4$ lässt sich übrigens durch direktes Ausmessen an der Figur bewahrheiten, und sei diese Aufgabe dem Leser vorbehalten. Um die Zusatzstromstärke 1, 11 zu erzielen, ist ein gewisser Spannungsaufwand erforderlich, dessen Grösse sich aus dem Quotienten $\frac{1, 11}{w_1}$ ergibt. Seine effektive Phase fällt mit 1, 11 zusammen und macht den Abschnitt 1, 13 aus. Die beiden Stromstärkenwellen, welche der belastete Umformer auf seiner primären Seite aufzuweisen hat, und deren gegenseitige zeitliche Verschiebung durch den Winkel 3, 1, 11 messbar ist, können nur in ihrer Vereinigung einen Aufschluss über die Stärke des in Wirklichkeit in dem primären Stromkreis fliessenden Gesammtstromes geben. Diese Vereinigung ist ebenfalls keine Addition, sondern vollzieht sich nach dem Dreiecksschema. Das Resultat der Zusammensetzung besteht in dem Erhalt der Geraden 1, 12, welche S_{eff_1} gleichwertig ist. In analoger Weise wird der der Gesammtstromstärke entsprechende Spannungsaufwand festgestellt. Er ergibt sich als Seite 1, 14 des Dreiecks 1, 13, 14. Die Spannungsbeträge 1, 14 und 1, 4 umfassen alle Einzelbestandteile, aus denen sich die in ihrer Grösse unveränderliche Anschlussspannung aufbaut. Ihre Grösse und Richtung muss so geartet sein, dass sich aus ihnen und dem gegebenen E_{eff_1} das Dreieck 1, 5, 4 bilden lässt. Da 1, 14 grösser gestaltet ist und mit 1, 4 einen kleineren Winkel bildet, als der Spannungsabfall 1, 2 im Leerlaufsschema der Figur 55, so folgt hieraus, dass durch die Belastung eine, wenn auch nur geringe Abnahme von 1, 4 und somit auch eine solche von 1, 6; 1, 3;

1, 2; und 1, 7 bedingt wird. Der dadurch freibleibende Anteil von E_{eff_1} ist notwendig, um die durch die sekundäre Belastung hervorgerufene Mehrerzeugung von Primärstrom zu ermöglichen. Die Phasenverschiebung zwischen S_{eff_1} und E_{eff_1} ist durch den Winkel 12, 1, 5 bestimmt. Die gesammte, in der primären Spule entwickelte elektrische Leistung wird durch das Produkt $E_{eff_1} \times S_{eff_1} \times \cos \alpha_1 = 1, 5 \times 1, 12 \times \cos 12, 1, 5$ repräsentirt. Soll dieses Wattquantum in Ordnung gehen, so muss es ohne Zweifel jener Wattsumme gleichkommen, welche sich aus der sekundären Leistung und den Verlustleistungen ergibt. Die sekundäre Leistung beträgt $1, 11 \times 1, 4 \times \cos 11, 1, 4$. Die Verlustleistungen setzen sich aus drei Teilen zusammen, und zwar zunächst aus $1, 2 \times 1, 3$. Dieser Verlust ist durch den Ohmschen Widerstand und die Wirbelstrombildung bedingt. Der zweite Verlust beträgt $1, 3 \times 1. 4 \times \cos 3. 1. 4$; er verkörpert die Wirkung der Hysteresis. Als dritter Verlust figurirt das Produkt $1, 11 \times 1, 13$; er ist durch den Ohmschen Widerstand und die Zusatzstromstärke verursacht. Werden die Linien und Winkel ausgemessen, und die Vervielfachungen und Zusammenzählungen ordnungsgemäss durchgeführt, so lässt sich die Gleichheit der Wattmengen direkt an der Figur 56 nachweisen und damit eine Probe für die Richtigkeit der Betrachtungen geben.

Mit dem Bisherigen ist zwar ein genügend tiefer Einblick in den Mechanismus des belasteten Umformers gewonnen, aber immerhin nur für die Voraussetzung eines bestimmten, unveränderten Gleichgewichtszustandes. Eine Ergänzung nach der Richtung, dass auch die Unterschiede, welche beim Vergleich aller möglichen Belastungsgrade hervortreten, eine Kennzeichnung erfahren, ist sehr zweckdienlich. Hiebei ist es wünschenswert, die einschlägigen Betrachtungen an zwei specielle Arten. Belastungsänderungen durchzuführen, zu knüpfen. Die erste lässt die sekundäre Stromstärke von ihrem Nullwert bis zu dem zulässigen Maximalwert variiren, ohne an der zeitlichen Verschiebung zwischen E_{eff_2} und S_{eff_2} das Geringste zu ändern. Es muss daher auch der Winkel 11, 1, 4 einen konstanten Betrag ausmachen. Ist S_{eff_2} im Anwachsen begriffen, so ist dasselbe auch bei der Zusatz-

stromstärke 1, 11 und dem Spannungsanteil 1, 13 der Fall. Für $S_{eff_2} = 0$ ist auch 1, 11 = 0, und die kombinirte Stromstärke schrumpft zu 1, 3 zusammen. Je grösser hingegen 1, 11 wird, je mehr also die Belastung zunimmt, desto grösser wird 1, 12 und desto kleiner fällt der Winkel 12, 1, 11 und auch der für den Leistungsfaktor maassgebende Winkel α_1 aus. Es zeichnet sich demnach der Umformer bei schwachen Belastungen durch grosse Phasenverschiebung zwischen E_{eff_1} und S_{eff_1} aus, während normale und maximale Belastungen dieselbe wesentlich herabdrücken. Dass das Leerlaufsschema der Figur 55 mit dem Anwachsen von 1, 11 eine Reduzirung erfährt, welche zwar insgesammt nicht so stark ausgeprägt ist, um E_{eff_2} und auch e_{eff_2} nennenswert abfallen zu lassen, fand bereits Erwähnung. — Die zweite Art der Belastungsänderung besteht darin, durch geeignete Einschaltungen im sekundären Stromkreis nicht die Stromstärke, sondern nur die Phasenverschiebung α_2 zu vergrössern, bezw. zu verkleinern. In einem solchen Schema muss natürlich auch die Zusatzstromstärke 1, 11 unverändert bleiben, und der Winkel 11, 1, 4 sich stets dem gerade vorhandenen Winkel α_2 gleich gestalten. Ist $\alpha_2 = 0$, so fällt 1, 8 mit 1, 7 und 1, 11 mit 1, 4 zusammen. Diese Drehung von 1, 11 gegen 1, 4 hat auch eine gleichartige, der der gesammten Stromstärke entsprechenden Geraden 1, 12 im Gefolge. Zu dieser neuen Lage von 1, 12 gesellt sich noch eine Verkleinerung der Längenausdehnung. Trotzdem die sekundäre Leistung durch den Wegfall der Phasenverschiebung eine wesentliche Vergrösserung erfährt, und damit auch die primäre Seite zu grösseren Wattlieferungen herangezogen wird, vollzieht sich mit S_{eff_1} dennoch eine Verkleinerung, so dass die primäre Mehrleistung nur durch die thatsächlich eintretende Verringerung des Winkels α_1 möglich erscheint. Aber noch eine andere, für die Elektrotechnik verhältnissmässig wichtigere Erscheinung ist mit der Reduzirung des Winkels α_2 verknüpft. Dieselbe ist namentlich dann quantitativ erheblich ausgeprägt, wenn auch der Einfluss des primären Nebenfeldes Veranschlagung findet. Es zeigt sich alsdann, dass der Übergang von der selbstinduktiven auf selbstinduktionslose Belastung, trotz der Unveränderlichkeit des E_{eff_1}, von einer

Vergrösserung der E_{eff_2}-Spannung begleitet ist. Aus allem Diesem geht die Erkenntniss hervor, dass ein Umformer hinsichtlich der Ausnützungsfähigkeit um so ökonomischer seinen Funktionen nachkommt, je weniger er sekundär Phasenverschiebung besitzt. Zum völligen Verständniss der Bedeutung der durch die andersartige Phasengruppirung bedingten sekundären Spannungsänderung soll dieselbe noch durch eine zweite Ausdrucksform, welche der Praxis angepasst ist, charakterisirt werden. Sobald ein Sekundärstromkreis, welcher nur Glühlampen umfasste, auch Elektromotoren aufnimmt, fällt E_{eff_2} ab, auch wenn die Stromstärke ungeändert bleibt, und zwar in um so grösserem Maass, je mehr Selbstinduktion durch die Motoren in den Stromkreis eingeführt wird.

In dem Schema der Figur 56 fand die bereits auf Seite 189 namhaft gemachte Erscheinung der Nebenfelderbildung bis jetzt noch keine Berücksichtigung. Ihr Einfluss auf die Vorgänge im Umformer tritt nur im Belastungszustand auf, zieht aber alsdann sowohl die primäre, als auch die sekundäre Seite in Mitleidenschaft. Beschränkt man sich zunächst auf die primäre Seite, so lässt sich das früher Gesagte dahin spezialisiren, dass nicht alle durch die primäre Gesammtstromstärke S_{eff_1} entstehenden Kraftlinien die Sekundärspule durchsetzen, sondern teilweise ein primäres Nebenfeld bilden. Erfahrungsgemäss nimmt die Grösse dieses Nebenfeldes mit wachsender Sekundärbelastung zu, so dass, bei gleichbleibendem E_{eff_1}, die induzirte Spannung E_{eff_2} in entsprechendem Maass abnehmen muss. Die Wirkung des Nebenfeldes in der Primärspule besteht in der Hervorbringung einer 1, 12 um 90^0 nacheilenden Selbstinduktionsspannung. Dieser Selbstinduktionsspannung hält ein gleich grosser Betrag der Anschlussspannung das Gleichgewicht, was natürlich zur Folge hat, dass die quantitative Leistungsfähigkeit des Umformers um einen von der Grösse und der Lage dieses Betrages abhängenden Wert gekürzt wird. Sollen die in der Figur 56 eingezeichneten Effektivphasen hinsichtlich ihrer Grösse keine Beeinträchtigung erfahren, so ist dies nur möglich, wenn der Anschlussspannung 1, 5 eine den Einfluss des primären Neben-

feldes aufwiegende Abänderung zuteil wird. Um die Figur 56 nicht unübersichtlich zu gestalten, soll zur Darstellung der korrigirten Anschlussspannung eine neue Figur Verwendung finden, welche nur die Linien 1, 5; 1, 12; 1, 7 und 1, 8 mit der obigen Figur gemeinsam hat. Die der Selbstinduktionsspannung des primären Nebenfeldes gleichwertige Gegenspannung ist in der

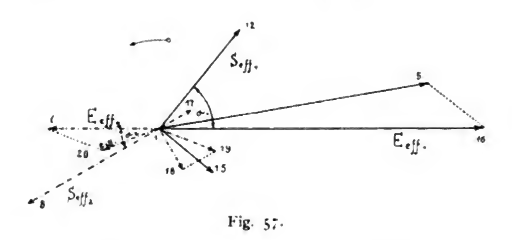


Fig. 57.

Figur 57 durch die 1, 12 um 90° voreilende Phase 1, 15 dargestellt. Aus ihr und 1, 5 ergibt sich mit der Hülfskonstruktion des schiefwinkligen Dreiecks 1, 5, 16 die für die geforderte Leistung maassgebende Anschlussspannung 1, 16. Da 1, 15 senkrecht auf 1, 12 steht, so ist die Schlussfolgerung gestattet, dass die Erscheinung der Nebenfelderbildung von keinem Aufwand an nützlicher elektrischer Leistung begleitet ist. Trotzdem 1, 16 grösser als 1, 5 ist, kann demnach 1, 16 × 1, 12 × cos 12, 1, 16 keinen grösseren Ziffernwert ergeben, als den, welchen das Produkt 1, 5 × 1, 12 × cos 12, 1, 5 ausmacht. In der Figur 57 lässt sich auch noch auf einfache Weise die den Elektrotechniker sehr interessirende effektive Phase der sekundären Anschlussspannung feststellen. Diese ist natürlich kleiner als E_{eff_2}, und zwar wird die Differenz durch den dem Ohmschen Widerstand der Sekundärspule entsprechenden Spannungsbetrag und durch die gesammte Selbstinduktionsspannung, also auch die des sekundären Nebenfeldes, hervorgerufen. Die erstere Spannung ist S_{eff_2} entgegengerichtet, und ihre effektive Phase demnach durch 1, 17 zu verbildlichen; die letztere eilt S_{eff_2} um 90° nach und entspricht somit der Geraden 1, 18. Diesen beiden Phasen kommt die aus dem

Dreieck 1, 18, 19 hervorgehende Phase 1, 19 an Wirkung auf E_{eff_2} gleich. Sie eilt E_{eff_2} um den Betrag des Winkels 7, 1, 19 nach, so dass noch das zweite Dreieck 1, 7, 20 zu entwerfen ist, um mit dessen Seite 1, 20 die sekundäre Anschlussspannung e_{eff_2} zu erhalten.

Zur Vervollständigung der Darstellungen über das Wirken im Umformer ist es angebracht, nochmals auf das auf Seite 188 und 189 angeführte Grössenverhältniss zwischen E_{eff_1} und e_{eff_2} zurückzugreifen. Es zeigte sich dort, dass wohl der Quotient $\frac{e_{eff_1}}{E_{eff_2}}$ mit dem $\frac{Z_1}{Z_2}$ vollständig übereinstimmt, dass dies aber für $\frac{E_{eff_1}}{e_{eff_2}}$ nur angenähert gilt. Die Ursache der Abweichung von dem Gesetz der Windungszahlen wurde durch den Einfluss des primären und sekundären Ohmschen Spannungsabfalles und durch den der beiden Nebenfelder begründet. Beide Einflüsse machen sich auch in dem erweiterten Umformerschema in derselben Weise geltend und zwar werden sie in quantitativer Hinsicht um so belangreicher sein, je mehr Energie zur Umformung gelangt. Als Grössen, welche ebenfalls an der Verwischung des Gesetzes der Windungszahlen anteilnehmen, haben sich in den späteren Betrachtungen die durch den Sekundärstrom bedingte Reduzirung des Leerlaufsschemas und die selbstinduktive Sekundärbelastung zu erkennen gegeben. Es ist für den Umformer berechnenden Mann vom Fach eine recht wichtige und oft schwierige Aufgabe, dafür Sorge zu tragen, dass die von ihm geschaffenen papierenen Werte in Wirklichkeit nicht mehr als wünschenswert abfallen. Auf Seite 185 wurde eine für die Umformung ebenfalls wichtige Formulirung aufgestellt, und zwar die Gleichsetzung $\frac{S_{eff_2}}{S_{eff_1}} = \frac{Z_1}{Z_2}$.

Auch dieser Grössenzusammenhang kann in Anlehnung an die Figur 56 nur Anspruch auf angenäherte Uebereinstimmung erheben. Er gilt allerdings für die Stromstärken S_{eff_2} und 1, 11, wird aber für S_{eff_1} durch die Leerlaufsstromstärke 1, 3 abweichend beeinflusst.

Zum Schluss des Abschnitts IV mag auch die auf Seite 183 in Aussicht gestellte Orientirung über die Mittel und Wege zur Umgehung der variabeln Induktionskoeffizienten noch den Platz finden, der ihr gebührt. So viel man sich auch in manchen traditionellen Lehrbüchern Mühe gibt und gab, den Anschein von der gelungenen Umgehung der variabeln Durchlässigkeit zu erwecken, so wenig sind hier Gründe vorhanden, dem Leser das völlige Misslingen derartiger Bestrebungen zu verschweigen. Der Umstand, dass die Felder der Stromstärken 1, 8 und 1, 11 (Siehe Figur 56) für alle Belastungen gleich gross sind und sich einander direkt entgegenwirken, so dass ihre Durchlässigkeiten für das der Figur 56 zu Grund liegende Umformerschema allerdings belanglos werden, gab die Veranlassung zu dem Glauben, die durch die Natur des Eisens bedingte, lästige Variabilität aus den Wechselstrombetrachtungen tilgen zu können.

Namenverzeichniss.

Die aufgeführten Zahlen entsprechen derjenigen Buchseite, auf welcher die Erklärung für den betreffenden Namen gegeben wird.



Buchstabenverzeichniss.

A = Ampère
𝔄 = Arbeit
𝔅 = Elektromagnetische Feldstärke oder sekundliche Feldänderung
B = Feldbreite
D = Rahmenbreite
E = Spannung im Allgemeinen, oder Anschlussspannung, oder Elektromotorische Kraft
e = Gegenspannung
η = Wirkungsgrad
E_f = Wirbelstromspannung
E_h = Hysteresisspannung
E_s = Selbstinduktionsspannung
E_w = Ohmscher Spannungsbetrag
gr-Cal = Grammkalorie
ℌ = Elektrische Feldstärke
H-W = Hektowatt
H-W-St = Hektowattstunde
ℑ = Magnetische Feldstärke
kgr-Cal = Kilogrammkalorie
kgrm = Kilogrammmeter
K-W = Kilowatt
K-W-St = Kilowattstunde
l = Messfeldabstand oder Ringleiterradius oder Spiralenlänge in cm.
𝔏 = Leiterlänge in m
L = Leistung
M = Gesammte Wärmemenge

μ = Durchlässigkeit
n = Minutliche Umdrehungszahl
Ω = Ohm
P = Bewegungsantrieb im Wirbelfeld
P-S = Pferdestärke
q = Spulenquerschnitt in qcm
Q = Leiterquerschnitt in qmm
s = Spezifischer Widerstand
S = Stromstärke
$S_{\mathfrak{B}_{max}}$ = Stromstärkenphase zur Hervorbringung von $\mathfrak{B}_{max}$
S_s = Selbstinduktionsstromstärke
S_w = Energiestromstärke
T = Zeit in Sekunden
V = Volt
W = Watt
W-Sk = Wattsekunde
W-St = Wattstunde
w = Widerstand
Z = Windungsanzahl
∼ = Periodenanzahl

Indexbezeichnungen,

zu den Buchstaben E, e, 𝔅, ℌ, S und Z gehörend:

eff = effektiv, max = maximal,
mitt = mittlere,
1 = primär, 2 = sekundär.

Druck von Herrmann Starke (C. Plasnick)
Grossenhain.

